UNTERSUCHUNGEN ÜBER DEN ELEKTRIZITÄTSÜBERGANG BEI ULTRAMIKROSKOPISCHEN KONTAKTABSTÄNDEN UND DIE ELEKTRONENATMOSPHÄREN DER METALLE.

INAUGURAL-DISSERTATION

ZUR

ERLANGUNG DER DOKTORWÜRDE

DER

HOHEN PHILOSOPHISCHEN FAKULTÄT

DER

UNIVERSITÄT LEIPZIG

VORGELEGT

VON

FRANZ ROTHER
AUS NÜRNBERG.

ACAD. LUGD. BAT. BIBL.

LEIPZIG
JOHANN AMBROSIUS BARTH
1914

Angenommen von der III. Sektion
auf Grund der Gutachten der Herren
Wiener und Des Coudres.

Leipzig, den 13. Januar 1914.

Der Prokanzellar
Kirchner.

Druck von Metzger & Wittig in Leipzig.

Die vorliegenden Untersuchungen wurden im Physikalischen Institut der Universität Leipzig ausgeführt. Ich möchte auch an dieser Stelle

Herrn Geh. Hofrat Prof. Dr. O. Wiener

für die Anregung dieser Arbeit und das stetige Interesse daran, und

Herrn Prof. Dr. H. Scholl

für die, in liebenswürdigster Weise gegebenen, wertvollen Ratschläge meinen besten Dank aussprechen.

Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41547026_0072

Inhaltsverzeichnis.

Seite

I. Einleitung 9

II. Die Versuchsanordnung 12

a) Der optische Teil 12

b) Der elektrische Teil 18

1. Die Schaltung 18

2. Das Quadrantelektrometer und die Vergleichskapazität 19

3. Die Kontakte 23

III. Die Entladungserscheinungen 31

IV. Die Auswertung der Messungen und die Elektronenatmosphären der Metalle 40

V. Zusammenfassung der Resultate 50

I. Einleitung.

Wenn man in üblicher Weise zwischen zwei Metallen durch Aneinanderpressen mit einer Klemme, oder zwischen Stöpsel und Stöpselbacken einen elektrischen Kontakt herstellt, so ist nach allem, was man weiß, kaum anzunehmen, daß an irgend einer Stelle der Kontakt ein derartig inniger ist, daß sich nicht noch Luft zwischen den Metallen befände. Da man ferner kaum annehmen wird, daß sich die Luft an dem Leitungsvorgang beteiligt, so ist zu vermuten, daß der Transport der Elektrizität von Metall zu Metall durch Elektronen erfolgt, welche den geringen Zwischenraum überspringen. Von diesem Standpunkt aus bietet eine Untersuchung, welche den zwischen möglichst definierten Metallflächen bei angelegter niederer Spannung eintretenden Strom als Funktion des einen möglichst kleinen Teil einer Lichtwelle betragenden Abstandes darzustellen versucht, großen Reiz. Auf dieser Betrachtung fußend, schlug mir Hr. Prof. Wiener vor, eine solche Untersuchung in der Weise aufzunehmen, daß der kleinste erreichbare Abstand von Metallflächen durch eine Interferenzmethode bestimmt würde.

In einer kurzen Veröffentlichung teilte ich bereits mit,[1]) daß es nun tätsächlich möglich war, Stromübergang über sehr kleine Kontrakttrennungsstrecken zu erhalten bei einer kleinsten, angelegten Spannung von etwa einem Volt. Bei diesen Versuchen traten keinerlei Entladungserscheinungen im gewöhnlichen Sinn, wie Funken- oder Lichtbogenbildung auf. Die damalige Vermutung, daß einige der beobachteten Vorgänge doch durch derartige Bogenentladungen zu erklären wären, hat sich als nicht richtig erwiesen.

1) F. Rother, Physik. Zeitschr. **12**. p. 671. 1911.

Die Untersuchungen, die bis dahin über den Elektrizitätsdurchgang durch sehr kurze Trennungsstrecken angestellt worden waren, liefen alle darauf hinaus, das an den Kontakten herrschende Potential zu bestimmen in dem Augenblick, wo eine Entladung über die Trennungsstrecke einsetzte. Eine notwendige Folge dieser, mit verhältnismäßig hohen Spannungen ausgeführten Versuche war, daß die Kontakte bei jeder Entladung auf mehr oder weniger grobe Weise zerstört wurden, so daß die Erscheinungen unter genau denselben Umständen nie reproduziert werden konnten.[1]) Demgemäß hatte man bei diesen Versuchen auch Vorkehrungen getroffen, um entweder die Kontakte bequem gegen neue auswechseln, oder bei sphärischen Flächen stets unbenutzte Stellen einander gegenüberbringen zu können. Da der Zweck jener Arbeiten darin bestand, Entladungspotentiale zu bestimmen, so war es auch nicht möglich, Aufklärung über eventuelle Erscheinungen kurz vor dem Zustandekommen eines metallischen Kontaktes zu erhalten. Es ist aber von großem Interesse, zu untersuchen, ob bei sehr kleinen Kontaktabständen nicht noch eine andere Entladungsform existiert, bevor ein Funke oder Lichtbogen einsetzt. Ist eine solche vorhanden, so muß es möglich sein, den bei geringem Kontaktabstand übergehenden Strom zu messen, wenn man ein Meßinstrument mit den Kontakten und einer Stromquelle in Reihe schaltet; dabei darf natürlich das Potential nicht bis zu einer Funkenentladung gesteigert werden. Nur wenn man in der angedeuteten Weise vorgeht, ist es möglich, Stromwerte und nicht nur Entladungspotentiale zu erhalten, und nur dadurch kann man einen tieferen Einblick in die Vorgänge an Metalloberflächen gewinnen, wenn man an diese bei sehr kleinem Abstand ein relativ niedriges Potential anlegt.

In neuester Zeit teilte nun R. W. Wood[2]) Beobachtungen kurz mit, anscheinend in Unkenntnis über meine frühere Veröffentlichung. Da jene mit einem Teil meiner Vorversuche in

1) Kinsley, Phil. Mag. (6) **9.** p. 692. 1905; G. M. Hobbs, Phil. Mag. (6) **10.** p. 617. 1905; Earhart, Phil. Mag. (6) **1.** p. 147. 1901; Earhart, Phil. Mag. (6) **16.** p. 48. 1908; G. Hoffmann, Phys. Zeitschr. **11.** p. 961. 1910.

2) R. W. Wood, Phil. Mag. (6) **24.** p. 316. 1912.

der Ausführung einige Berührungspunkte haben, soll auf dieselben, soweit sie für die vorliegende Arbeit in Betracht kommen, kurz eingegangen werden. Zunächst dienten Wood bei seinen Versuchen die planen Glasplatten eines Interferometers als Kontakte. Sie waren feucht versilbert und halb durchsichtig. Bei nur 1 Volt angelegter Spannung wurde Stromübergang bis zu einem Plattenabstand von 28 Wellenlängen beobachtet. Diese Erscheinung erklärte Wood dahin, daß er den auftretenden Effekt den großen parallelen Oberflächen zuschrieb, d. h. dem großen Querschnitt der Trennungsstrecke. Ein solcher war bei den früheren englischen Arbeiten nicht vorhanden, da dort nur Spitzen und stark gekrümmte, sphärische Flächen benutzt wurden. Da nun die Erscheinungen unter Benutzung der nach oben erwähnter Methode hergestellten Silberspiegel nicht reproduziert werden konnten, da sich bei Annäherung der Platten dazwischen befindliche Fremdkörperchen störend bemerkbar machten, wurden die Versuche mit Linsen von großem Krümmungsradius, auf welche durchsichtige Goldspiegel kathodisch niedergeschlagen waren, fortgesetzt. Diese Linsen gestatteten jedoch auch kein einwandfreies Arbeiten; infolge der großen Krümmung spielte der Staub noch eine bedenkliche Rolle, um so mehr, als keine vergleichenden Versuche im Vakuum angestellt wurden. Meine Voruntersuchungen bewegten sich, wie oben erwähnt, in eben dieser Richtung; die Staubfrage wurde dabei besonders berücksichtigt. In dieser Hinsicht wurden eingehende Versuche mit Metallspiegeln auf Glas sowohl in Luft als auch im Vakuum angestellt, die ebenso, wie die Untersuchungen von Wood, die außerordentliche Schwierigkeit, größere Flächen frei von winzigen Fremdkörpern zu halten, hervortreten ließen. Die von Wood benutzten, durchsichtigen Metallspiegel sind außerdem noch sehr leicht Oberflächenverletzungen durch Staubpartikelchen ausgesetzt, so daß auch die Schicht selten einwandfrei sein wird. Die in dieser Hinsicht von mir gemachten Erfahrungen werden an späterer Stelle mitgeteilt werden, da sie interessante Vergleiche mit den von R. W. Wood erzielten Erscheinungen bieten. Metallspiegel auf Glas erwiesen sich für den Zweck der vorliegenden Arbeit jedenfalls als nicht brauchbar. Das Ziel wurde vielmehr, wie schon mitgeteilt,

mit Kontakten anderer Art erreicht. Die Vorversuche werden, soweit sie noch nicht veröffentlicht sind (l. c.), an den Stellen der Arbeit, die sie jeweilig betreffen, mitgeteilt werden.

II. Die Versuchsanordnung.

a) Der optische Teil.

Zur Herstellung und Größenbestimmung der Trennungsstrecken zwischen den zu untersuchenden Kontakten diente ein Interferometer Michelsonscher Art (bezogen von Adam

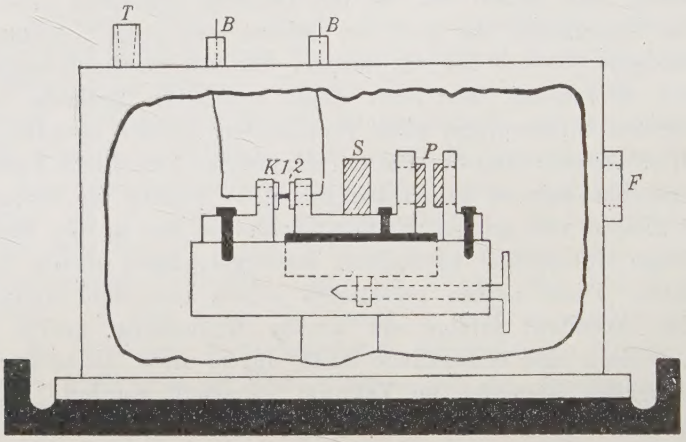


Fig. 1.

Hilger in London). Dasselbe wurde in einen gußeisernen Kasten gesetzt, der evakuiert werden konnte und zwecks besserer Dichtung lackiert war. Die Anordnung ist aus Fig. 1 ersichtlich. Auf dem Interferometerschlitten war ein kräftiges, zweimal rechtwinklig gebogenes Gußstück aufgesetzt, das auf der einen Seite den einen Kontakt, auf der andern eine genau plane Glasplatte trug. Dieser Platte gegenüber befand sich eine zweite, an einem Metallarm montiert, dessen eines Ende mit dem Schlittenbett fest verschraubt war. Am andern Ende des Interferometers war dem, mit dem Schlitten beweglichen gegenüber, der zweite Kontakt starr befestigt. Die Montierung der Kontakte wird später genauer zu besprechen sein (*K 1* und *K 2*). Die beiden Planplatten (*P*) sind in der Fig. schraffiert,

ebenso der Spiegel (S), der das, durch ein in den Kasten eingekittetes Fenster eintretende Licht einer Quecksilberlampe (Q Fig. 2) auf das Plattensystem warf. Ein zweites Fenster (F) diente zur Beobachtung mit dem Fernrohr. Fig. 2 zeigt die optische Anordnung von oben gesehen. Eine Linse (L) erzeugte ein paralleles Lichtbüschel, das durch den Spiegel (S, vgl. Fig. 1) auf das Plattensystem geworfen wurde. Die so entstehenden Ringe gleicher Neigung wurden in der Durchsicht mit einem mit Okularmikrometer versehenen, auf unendlich eingestellten Fernrohr beobachtet. Die planen Flächen der Interferometerplatten waren nach Fabry und Perrot durch Kathodenzerstäubung fast undurchlässig versilbert. Be-

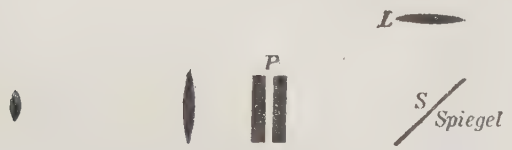


Fig. 2.

obachtet wurde im Lichte der grünen Quecksilberlinie ($\lambda = 546$), bei einem Plattenabstand von nur ca. 1,5 mm. Die Ringe waren dabei sehr helle, scharfe Linien auf tief dunklem Grunde. Die übrigen Strahlen der Quecksilberlampe wurden durch zwei vorgeschaltete Glaströge mit Kaliumchromat und Didymchlorid weggenommen.

Die Befestigung der Planplatten in ihren Fassungen in der von Hilger gelieferten Form erwies sich als nicht zweckmäßig. Die Platten saßen ursprünglich in einem Metallring und konnten durch drei übergreifende, zylindrische Schraubenköpfe gegen drei über den Ring vorstehende, elastische Blechnasen gedrückt werden. Diese Art der Befestigung diente zugleich zur groben Justierung. Es zeigte sich aber, daß durch den dabei ausgeübten Druck die Platten deformiert wurden, so daß die Interferenzringe immer ganz verzerrt erschienen. Deshalb wurden die Gläser in Metallringe eingekittet und diese Ringe erst der oben beschriebenen Prozedur unterworfen.

Zwecks Feinjustierung der Platten konnte der Metallarm, an dem die feste Platte saß, durch Federkraft etwas durchgebogen werden. Eine vollkommene Parallelstellung ist erreicht, wenn die Ringe beim Hin- und Herbewegen des Auges in zwei zueinander senkrechten Richtungen (parallel zu den Plattenflächen) nicht mehr wandern. Die grobe Parallelstellung der versilberten Flächen war sehr schnell und leicht zu bewerkstelligen. Da sich zwischen Linse und Quecksilberlampe eine, in schwarzen Karton scharf eingeschnittene, kreisrunde Öffnung von ca. 8 mm Durchmesser befand, so brauchte die Linse nur so gestellt zu werden, daß man im Fernrohr ein scharfes Bild dieser Öffnung sah; waren die planen Flächen der Platten gegeneinander geneigt, so bekam man eine große Zahl reflektierter Bilder. Durch geeignetes Anziehen der groben Justierschrauben rückten jene zusammen; im Augenblick, wo nur noch eines im Gesichtsfeld erschien, war auch bereits das Interferenzsystem sichtbar. Man konnte also dadurch, ohne lange herumprobieren zu müssen, die Ringe schnell ins Gesichtsfeld bringen.

Die Schraube des Interferometers besaß eine Ganghöhe von 1 mm und einen toten Gang von ca. $^1/_{20}$ mm, letzterer durfte durch Zusammenpressen der Gewindemutter nicht weiter verringert werden, da sonst der Schlitten durch die Schraubenspindel bei der Fortbewegung etwas aus seinem Bett gehoben wurde. Diese Erscheinung machte sich bereits bei sehr kleinen Schlittenbewegungen geltend; wenngleich dieselbe minimal war, so hatte sie doch auf die Justierung merklichen Einfluß. Der tote Gang war beim Arbeiten weiter nicht störend, sondern erforderte nur bei Umkehr der Bewegungsrichtung einige Aufmerksamkeit.

Der Kasten mit dem Interferometer ruhte auf einem sehr stabilen Steinpfeiler unter starker Filzzschwischenlage. Erschütterungen, wie sie z. B. durch heftiges Schließen von Türen hervorgebracht wurden, verursachten ein Vibrieren der nicht verschiebbaren Planplatte, da diese ja an einem, einige Zentimeter langem Arm für die Feinjustierung befestigt war. Ein Einfluß solcher, sehr selten vorkommenden Erschütterungen auf die Schlitten- und damit auf die Kontaktstellung wurde nie bemerkt. Die Temperatur konnte während der Versuche

im Zimmer auf $^1/_3$ Grad konstant gehalten werden. Ungewollte Schlittenverschiebungen von einer optisch wahrnehmbaren Größe wurden nie beobachtet.

Der gußeiserne Kasten konnte gegen eine ebensolche Grundplatte unter Gummizwischenlage mit kräftigen Schrauben fest angepreßt werden (der Längsschnitt der Grundplatte ist in Fig. 1 schwarz ausgefüllt). Die Platte besaß einen erhöhten Rand; der Raum zwischen diesem und dem aufgesetzten Kasten wurde zwecks Abdichtung mit Quecksilber ausgefüllt.

Zum Evakuieren diente eine Gaede-Quecksilberpumpe und für das Vorvakuum eine ebensolche Öl-Kapselpumpe; beide waren ganz so, wie das Interferometer auf Steinpfeilern aufgestellt. Die Verbindung zwischen Kasten und Pumpe wurde durch einen dickwandigen, auf seine gute Beschaffenheit geprüften Gummischlauch hergestellt, dessen eines Ende in einen Stahlschliff mündete, der in einen am Kasten befindlichen Hohlkonus paßte (*T*, Fig. 1.) Eine Stiefel-Luftpumpe war als Vorpumpe nicht zu gebrauchen, da sie einmal nicht erschütterungsfrei arbeitete und dann auch Luft in das Vakuum zurückstieß, so daß die Interferenzringe fortwährend zitterten. Die anderen Pumpen konnten während der Beobachtung im Betrieb bleiben, ohne daß solche Störungen auftraten. Obwohl der Kasten lackiert war, gelang es nicht, mit dem Vakuum tiefer als 0,5 mm zu kommen. Zu Beginn des Evakuierens zitterten die Ringe etwas; nach 1 Minute etwa verschwand jedoch diese Erscheinung vollständig.

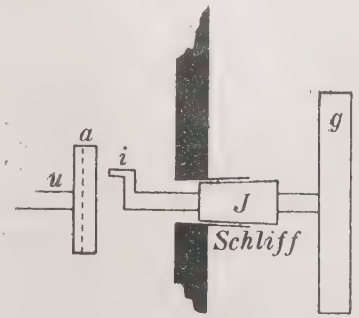


Fig. 3.

Der Kasten war ständig mit einer sehr großen Wulffschen Flasche verbunden, die mit Chlorcalcium teilweise gefüllt war. Phosphorpentoxyd wurde wegen einer möglichen ionisierenden Wirkung als Trockenmittel nicht benutzt.

Die Schlittenbewegung erfolgte von außen durch einen seitlich am Kasten angebrachten Stahlschliff (Fig. 3), dessen verlängerte Achse im Kasteninnern einen exzentrisch angeordneten

Stift (*i*) trug, der in eine, in die Platte (*a*) eingeschnittene, radiale Nut eingriff, sobald der Schliff in seinem Konus festsaß. Die Platte (*a*) befand sich am Ende der seitlich am Interferometer angebrachten Feinbewegungsschraube (*u*). Eine ganze Umdrehung dieser Schraube entsprach einer Schlittenverschiebung von $^1/_{100}$ mm. Der Umfang der am andern Ende der Schliffachse sitzenden Griffplatte (*g*) war in 400 Teile geteilt, so daß eine Schlittenverschiebung von $^1/_{40\,000}$ mm direkt eingestellt werden konnte; die Griffplatte hatte einen Durchmesser von 10 cm, gegenüber einer ursprünglich am Instrument befindlichen von 3 cm Durchmesser. Wenn nun auch $^1/_5$ der Teilung noch bequem geschätzt werden konnte, so war es doch nicht möglich, eine entsprechende Schlittenverschiebung optisch noch zu erkennen; es zeigte sich vielmehr, daß die Grenze bei $^1/_2$ der Teilung lag, entsprechend einer Schlittenverschiebung von $^1/_{80\,000}$ mm. Da die Schliffachse genügend genau in der Verlängerung der Feinbewegungsschraube lag, so war es möglich, noch kleinere Abstände (oder Verschiebungen) von mechanisch zu messender Größe herzustellen, wofern man nur die nötigen Vorsichtsmaßregeln beobachtete. So durfte man nur nach einer Richtung Schlittenbewegungen ausführen; kehrte man die Bewegungsrichtung um, so ging — nachdem der tote Gang überwunden war — der Schlitten zwar sofort mit, doch war es nun nötig, für ein und dieselbe Größe der Schlittenbewegungen größere Drehungen an der Feinbewegungsschraube auszuführen, als wenn längere Zeit nach derselben Richtung gearbeitet worden war. Man erhielt so z. B. für zwei Ringdurchgänge durch das Fadenkreuz des Fernrohrs unmittelbar nach Umkehr der Bewegungsrichtung, einen Wert von 980 mm anstatt 546 mm (grüne Quecksilberlinie) für die entsprechende Schlittenbewegung. Die Ablesungen wurden wieder richtig, wenn der Schlitten ungefähr um $^1/_{300}$ mm nach derselben Richtung bewegt worden war. Die Erscheinung hängt offenbar damit zusammen, daß das Öl, das sich in sehr geringen Mengen an der Schraube und den Zahnrädern der Feinbewegungsvorrichtung befindet, durch den einseitig wirkenden Druck allmählich zwischen den sich berührenden Flächen herausgepreßt wird. Daß hier elastische Kräfte tätig sind, kann man unmittelbar optisch erkennen, wenn man bei ausgeschalteter Feinbewegung

an der Millimeterschraube (Schlittenbewegungsschraube) des Interferometers schnell eine halbe Umdrehung ausführt; man sieht dann deutlich an den Ringen, daß, wenn man die Schraube schnell losläßt, eine Kraft vorhanden ist, welche den Schlitten in seine vorherige Stellung zu treiben sucht. Diese Erscheinung bedeutete für die vorliegende Untersuchung zunächst keine Störung oder Fehlerquelle, da es sich hier nur um Schlittenbewegungen von Bruchteilen einer Wellenlänge handelte; sie ist dabei von einer Größenordnung, die weit unterhalb der optischen Empfindlichkeit der benutzten Methode liegt.

Wurde nun, wie oben auseinandergesetzt, immer in derselben Richtung gearbeitet, so war es möglich — wenn auch nur schätzungsweise — noch mit kleineren Abständen als $^1/_{80\,000}$ mm zu arbeiten. Waren die Metallkontakte zur Berührung gebracht und wollte man nun einen Abstand einstellen, so konnte dieser, wie aus dem oben Gesagten folgt, natürlich nur optisch gemessen werden; eine zuverlässige Ablesung an der Teilung war eben wegen der, bei Bewegungsumkehr (und die mußte ja nach einmal hergestellter Berührung immer erfolgen) auftretenden, elastischen Nachwirkung nicht möglich. Umgekehrt war dies jedoch der Fall, wenn man aus relativ großer Entfernung die Kontakte einander näherte, da ja dann genügend Spielraum war, um durch Bewegen des Schlittens in einer Richtung die, durch die vorhergegangene Umkehr bedingten Ablesungsfehler am Teilkreis zu beseitigen. Der Genauigkeit, mit welcher ein Abstand hergestellt werden konnte, dürfte nach dem Gesagten mit $^1/_{80\,000}$ mm eine Grenze gesetzt sein. Weitere, die Mechanik des Apparates betreffende Erscheinungen müssen bei den Entladungsvorgängen besprochen werden, da sie mit diesen im innigsten Zusammenhang stehen.

Die Öffnung des Kastens erfolgte durch Hochklappen des oberen Teiles, der mit der Grundplatte durch ein sehr kräftiges Scharnier verbunden war (in Fig. 1 nicht gezeichnet). Die Verbindung der Bewegungsvorrichtung mit dem Interferometer war einfach durch Herausziehen des Schliffes (*J*) (Fig. 3) aus seinem, am Kasten sitzenden Konus, zu lösen.

b) Der elektrische Teil der Anordnung.

1. Die Schaltung.

Nachdem sich durch Vorversuche herausgestellt hatte, daß ein Stromübergang bei sehr kleinen Kontakttrennungsstrecken mittels eines Deprez-D'Arsonval-Galvanometers (10^{-8} Amp.) für angelegte Spannungen bis zu 6 Volt nicht nachzuweisen war, wurde mit Erfolg die Aufladung eines Quadrantelektrometers über die Trennungsstrecken benutzt. Fig. 4 zeigt die Schaltungsanordnung; eine Akkumulatorenbatterie (A) von 40 Volt Spannung und ca. 100 Amperestunden Kapazität war durch einen Widerstand (W) von 100000 Ohm geschlossen. Von diesem konnte eine beliebige Spannung abgezweigt werden, welche zu dem ersten der 3 bei N gezeichneten Quecksilbernäpfchen geführt wurde. Letztere waren unter Bernsteinzwischenlage auf einer Hartgummiplatte montiert und befanden sich elektrostatisch geschützt in einem Metallturm. Der Deckel desselben hatte eine Öffnung, so daß mit einem, an einem Bernsteinstäbchen befindlichen Kupferbügel zwei beliebige Näpfchen miteinander verbunden werden konnten. Das Bernsteinstäbchen war bis auf ein kleines Stück von 3 mm von einem Metallröhrchen umgeben, das durch einen biegsamen Draht geerdet war und zum Anfassen diente. Ohne diese elektrostatische Schutzmaßregel — d. h., wenn ein bloßes

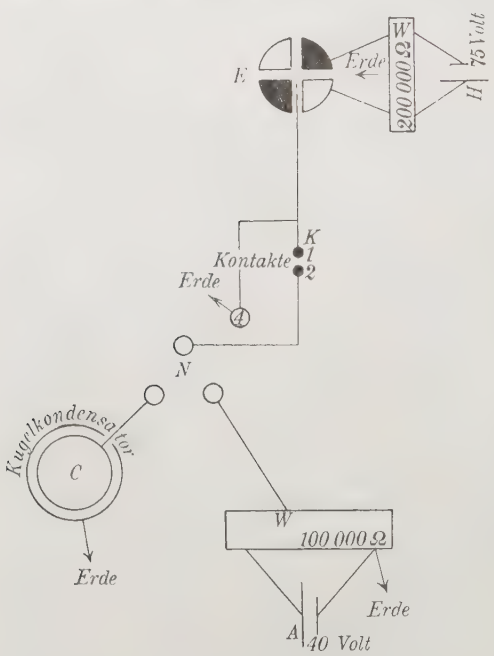


Fig. 4.

Bernsteinstäbchen benutzt wurde — wurden immer fremde Ladungen auf die mit den Näpfchen verbundenen Apparate durch die Turmöffnung übertragen. So war z. B. der Körper des Experimentierenden durch Hin- und Hergehen auf dem Linoleumbelag des Zimmers immer geladen; kam man dann, um den Bernstein anzufassen, mit der Hand in die Nähe der Turmöffnung, so wurde im Augenblick, wo man den Kupferbügel aus dem Quecksilber nahm, eine Influenzwirkung auf die Apparatur ausgeübt. Ein anfänglich benutzter Stromschlüssel mit Eisennäpfchen gab auch zu Störungen Anlaß, da jedesmal beim Eintauchen des Kupferbügels ins Quecksilber Reibungsströme erzeugt wurden, offenbar, weil das Quecksilber mit dem Eisen keinen genügenden Kontakt bildete; durch Benutzung von Messingnäpfchen wurde diese störende Erscheinung beseitigt. Wie aus Fig. 4 weiter ersichtlich, konnte bei N in der oben geschilderten Weise beliebig eine Verbindung der Stromquelle mit einem Kugelkondensator C, oder mit den Kontakten K, und, wenn sich diese metallisch berührten, direkt mit dem Quadrantelektrometer E hergestellt werden. Bei 4 befand sich ein kleiner Metallturm mit einem Quecksilberstromschlüssel im Innern, durch welchen das Elektrometer mit dem einen, ständig daran liegenden Kontakt $K1$ direkt geerdet werden konnte. Sämtliche Leitungen lagen natürlich in Metallhüllen; die in Fig. 4 mit $\prec$ bezeichneten Stellen waren geerdet. Zur Isolation diente durchweg Bernstein; Verbindungen von Leitern wurden — innerhalb des eigentlichen Entladungskreises — entweder durch Eintauchen in Quecksilber, oder durch Verlöten hergestellt.

2. Das Quadrantelektrometer und die Vergleichskapazität.

Das für die Untersuchung dienende Quadrantelektrometer wurde, um die Kapazität zu vermindern, in Nadelschaltung benutzt. In Fig. 4 bedeutet H eine Reihe von Hochspannungsakkumulatoren, die durch zwei hintereinandergeschaltete Widerstände W von je 100000 Ohm geschlossen waren; die Mitte, d. h. das Verbindungsstück dieser beiden, genau abgeglichenen Widerstände war geerdet. Die beiden freien Enden derselben, und damit zugleich die Pole der Batterie standen mit je einem

Quadrantenpaar in Verbindung. Die Glimmernadel des Elektrometers war durch Kathodenzerstäubung platiniert, das Gehänge aus Aluminium; der benutzte Wollastondraht hatte eine Dicke von 6 μ. Ein Quarzfaden, der durch verschiedene Methoden leitend gemacht wurde, erwies sich für den vorliegenden Zweck als nicht genügend zuverlässig. Das Gehänge, ein kurzer dünner Aluminiumdraht, trug am Ende ein massives Zylinderchen aus dem gleichen Metall, gegen welches ein zweites geschraubt werden konnte. Die Nadel, welche eine feine Bohrung hatte, wurde unter Stanniolzwischenlage dazwischen geklemmt. Der so erzielte Kontakt war außerordentlich gut und unveränderlich. Das Gehänge war ähnlich wie die Nadel nach Scholl[1]), die Justierung genau so, wie dort ausgeführt. Da es sich beim Öffnen des Kastens und beim Einsetzen von anderen Kontakten als notwendig erwies, die Anordnung auseinanderzunehmen, war am Torsionskopf des Elektrometers statt der Klemme ein Quecksilbernäpfchen angebracht, um mit den Zuleitungen Kontakt herstellen zu können, ohne das Elektrometer und insbesondere den Torsionskopf berühren zu müssen. Es hatte sich nämlich gezeigt, daß durch Anziehen der Klemme Verbiegungen am Elektrometer auftraten, die von Einfluß auf die Justierung waren. Der Kontakt war außerdem so auch zuverlässiger. Nach jeder Neu Zusammenstellung der Anordnung wurden die Konstanten des Elektrometers kontrolliert; eine merkliche Änderung derselben wurde nie beobachtet.

Die Kapazität des Elektrometers wurde durch Ladungsteilung ermittelt. Die vorhandenen Präzisionskondensatoren mit festem Dielektrikum waren als Vergleichskapazitäten nicht brauchbar, da sie, wenn auch sehr kleine, nicht zu beseitigende Ladungsrückstände zeigten. Auch bereitete der elektrostatische Schutz derselben Schwierigkeiten, da dieser nicht in Rechnung gezogen werden konnte. Deshalb wurde ein Kugelkondensator mit Luft als Dielektrikum gebaut, dessen Kapazität aus den Dimensionen ohne weiteres zu berechnen war. Derselbe bestand aus zwei konzentrischen Zinkkugeln, die mit großer Sorgfalt hergestellt waren. Der Innenradius der größeren be-

1) H. Scholl, Phys. Zeitschr. 9. p. 915. 1908.

trug 10 cm, der Außenradius der kleineren 9 cm; als größte Abweichung wurde auf den Durchmesser etwa $^1/_{20}$ mm festgestellt. Bei einer Kapazität von 90 cm bedingt dies im ungünstigsten Falle einen Fehler von noch nicht 0,5 Proz. Die kleine Kugel war im Innern der großen mit Bernsteinstützen befestigt; diese Stützen bestanden aus hohlen Bernsteinzylinderchen von 10 mm Durchmesser und 1 mm Wandstärke. Die Enden derselben waren den Krümmungsradien der Zinkkugeln entsprechend sphärisch angeschliffen; außerdem waren noch zwei Bohrungen senkrecht zur Längsachse vorhanden, damit möglichst viele Punkte von Flammengasen bestrichen werden konnten, die von Zeit zu Zeit durch das Innere des Kondensators gesaugt wurden, um überkriechende Ladungen zu beseitigen. Zu diesem Zweck saßen an der äußeren Kugel diametral 2 Ansatzrohre, die für gewöhnlich mit massiven Messingstücken, die natürlich genau paßten, ausgefüllt waren. Die nach dem Kugelinnern gerichteten Enden hatten selbstverständlich die entsprechende Krümmung. Diese ganze Vorrichtung, überkriechende Ladungen zu beseitigen, hat sich in jeder Hinsicht durchaus bewährt. Die Zuleitung zur inneren Kugel — die eine sehr geringe Kapazitätserhöhung bedeutet — erfolgte durch einen Kupferdraht, der durch eine an der äußeren Kugel sitzende Bernsteinisolation von 1 cm Dicke — die nicht in das Kugelinnere ragte — gehalten war. Da die oben angegebenen Abweichungen der Durchmesser in einem, die Kapazität verkleinernden Sinne lagen und die Zuleitung eine berechnete Kapazität von 6,5 cm besaß, so wird man mit der Annahme einer Gesamtkapazität von 97 cm (die 3 hohlen Bernsteinstützen bedeuten eine Erhöhung der Kapazität um annähernd 0,1 cm) keinen merklichen Fehler begehen. Mit diesem Wert wurde in der Folge gerechnet.

Die Elektrometerkapazität wurde folgendermaßen bestimmt: Nachdem die innere Kugel des Vergleichskondensators (in Fig. 5 als Plattenkondensator gezeichnet) über die Kontakte mit dem Elektrometer verbunden war, wurde an I (Fig. 5) ein Potential V gelegt. Hob man dann bei II die Erdung auf, so wurde auf II eine Elektrizitätsmenge CV frei in dem Augenblick, wo I geerdet wurde. Das Elektrometer zeigte dann eine bestimmte Spannung v an. Jenes wurde nun abgeschaltet,

entladen und wieder mit dem Kondensator verbunden; der Ausschlag zeigte nun eine geringere Spannung v'. Man hatte dann die Beziehung: $cv' = C(v - v')$, aus welcher die gesuchte Elektrometerkapazität c berechnet werden konnte; die Vergleichskapazität C betrug mit Zuleitungen 97 cm. In den so erhaltenen Werten für die Elektrometerkapazität ist natürlich die konstante Kapazität der Zuleitung mit enthalten. Legte man bei I (Fig. 5) verschiedene Potentiale an, so wurde durch das beschriebene Verfahren das Elektrometer zugleich auf Elektrizitätsmengen geeicht[1]). Um das Elektrometer bei der Kapazitätsbestimmung von der Vergleichskapazität abzuschalten, wurden einfach durch Drehen an der Feinbewegungsschraube des Interferometers die Kontakte K (Fig. 1 u. 4) auf einen genügend großen Abstand gebracht; ein solcher von ca. $^1/_{20}$ mm war völlig ausreichend. Dies war die ganze, zum Zu- und Abschalten des Kondensators nötige Bewegung, die außerdem im Vakuum stattfand. Da während der Kapazitätsbestimmung sonst keinerlei Veränderungen an den Schlüsseln und Leitern nötig waren und alles seine Lage behielt, so war damit ein sehr genaues Arbeiten ermöglicht. Die Isolation erwies sich als ausgezeichnet, so daß von dieser Seite keine Fehlerquellen zu befürchten waren.

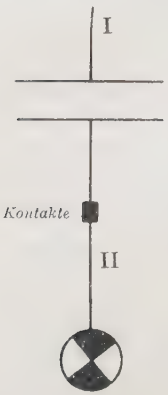


Fig. 5.

Die Elektrometerkapazität änderte sich mit dem Ausschlag sehr wenig; wiederholte Bestimmungen führten zu denselben Werten. Für die Beobachtung diente eine objektive Skalenablesung; der Skalenabstand betrug bei allen Versuchen 175 cm, die Hilfsladung der Quadranten 75 Volt. Mit dieser Spannung wurde die höchste Coulombempfindlichkeit erzielt. Elektrometerempfindlichkeit und Kapazität waren auf beiden Seiten des Nullpunktes völlig symmetrisch.

Im folgenden sind die Ergebnisse der Kapazitätsbestimmung mitgeteilt. Die 1. Reihe gibt die an dem Kondensator (bei I Fig. 5) angelegte Spannung; in der 2. steht die

1) F. Harms, Phys. Zeitschr. 5. p. 47. 1904.

vom Elektrometer angezeigte Spannung, nachdem II isoliert und I geerdet war, in der 3. die nach wieder Zuschalten des entladenen Elektrometers gesunkene Spannung. 3a zeigt die zu 3 gehörigen Ausschläge in Skalenteilen, aus denen der anfänglich lineare Verlauf der Spannungsempfindlichkeit ersichtlich ist; unter 4 stehen die zugehörigen Elektrometerkapazitäten.

(1) Volt	(2 Volt	(3) Volt	(3a) Skalenteile	(4) cm
0,037	0,018	0,01	8,5	77,6
0,075	0,036	0,02	17,0	77,6
0,151	0,072	0,04	34,0	77,6
0,265	0,121	0,067	56,0	78,1
0,419	0,195	0,108	89,0	78,1
0,656	0,306	0,168	137,0	79,6

3. Die Kontakte.

Die Form der nach vielen Versuchen als geeignet befundenen Kontakte ist aus Fig. 6 ersichtlich; die beiden Metallzylinderchen waren an den einander zugekehrten Flächen sphärisch angeschliffen und poliert. Ihr Durchmesser betrug 4 mm; die Kugelflächen hatten einen Krümmungsradius von 175 mm. Jeder Kontakt hatte am nicht gezeichneten Ende ein Gewinde, und außerdem eine Bohrung senkrecht zur Achse, um mit einem Stahlstift fest in ein, in einer Bernsteinplatte eingelassenes, metallisches Muttergewinde eingeschraubt werden zu können. Die Platte selbst saß in einer sehr kräftigen und stabilen Metallfassung, welch letztere dann am Interferometer befestigt war. Das Metallstück mit dem Muttergewinde war in die Bernsteinplatte eingeschraubt; es besaß auf der Kontaktseite einen zylindrischen, in den Bernstein eingelassenen Kopf, auf der anderen Seite eine Gegenmutter. Hier waren auch die Zuleitungen angelötet, welche zu Klemmen führten, die an den, im Eisenkasten befindlichen Bernsteinschliffen saßen (*B* Fig. 1).

Kontaktform. Fig. 6.

Die Herstellung brauchbarer sphärischer Flächen war sehr langwierig und schwer, da die höchsten Anforderungen betreffs der Glattheit der Oberfläche gestellt werden mußten. Da es sich um Abstände handelte, die weit unter der Größe

einer Lichtwellenlänge lagen, so genügte es nicht eine optisch einwandfreie Politur herzustellen; ein Kriterium für die Güte derselben waren vielmehr erst die Entladungen selbst. Der Einfluß verschiedener Poliermethoden auf die Oberfläche hinsichtlich deren Brauchbarkeit für die vorliegende Untersuchung war ganz außerordentlich. Näheres wird darüber bei den Entladungserscheinungen mitgeteilt werden. Als brauchbar erwies sich folgende Poliermethode: Zunächst wurden auf der Drehbank die Kugelflächen roh an die Metallzylinderchen angeschliffen, dann wurden letztere auf die Achse eines mit 2000 Touren laufenden Motors gesetzt und in der Schleifschale mit feinstem Schmirgelpapier poliert. Schließlich polierte man noch ca. 2 Stunden lang mit reinem Leder nach, wobei letzteres unter starkem Druck in der Schleifschale lag. Das Leder wurde mit der Zeit ganz schwarz vom Metall, so daß auf diese Weise die feinen Metallteilchen auch noch eine Polierwirkung ausübten. Mit den Kontakten wurden sofort nach Fertigstellung Versuche angestellt; dieselben durften nicht längere Zeit aufbewahrt werden, da sonst die Oberflächen „elektrisch schlecht“ wurden. Es kam außerordentlich viel darauf an, vollkommen metallisch reine Oberflächen zu erzielen. Kontakte, deren Oberfläche mit Zinnasche poliert war, waren für die Versuche unbrauchbar, da sie keinerlei Entladungserscheinungen mit den in Betracht kommenden Spannungen zeigten. Hingegen wurde durch derartig behandelte Oberflächen die Bestimmung der Kontaktkapazität bei sehr kleinen Abständen ermöglicht. Infolge des Ausbleibens der Entladungserscheinungen bei den mit Zinnasche behandelten Kontakten lag die Befürchtung nahe, daß die Veränderung, welche durch diese Poliermethode mit der Oberfläche vorging, nicht ohne Einfluß auf die Größe der Kapazität gegenüber normalen Kontakten sein würde. Um dies zu untersuchen, wurden Kapazitätsbestimmungen mit beiden Arten von Kontakten ausgeführt, und zwar in Abständen und mit Spannungen, bei welchen auch mit den normalen Kontakten noch keinerlei Entladungen einsetzten. Es zeigte sich, daß unter sonst gleichen Umständen die Kapazitätswerte für beide Arten von Kontakten vollkommen gleich waren. Man durfte also annehmen, daß die Schicht, welche auf den Metalloberflächen

durch Behandlung mit Zinnasche erzeugt wurde, nicht die Rolle eines Dielektrikums von einiger Bedeutung spielte und auch bei sehr kleinen Abständen keine merkliche Fehlerquelle bedeutete.

Um nun die Kontaktkapazität zu bestimmen, wurde zunächst am Interferometer ein bestimmter Kontaktabstand eingestellt. Der eine Kontakt war dabei mit dem Elektrometer verbunden, an den andern wurde ein bestimmtes Potential gelegt. Die Schaltung war wie in Fig. 5, nur daß an Stelle der beiden Kugeln die Kontakte traten. Ebenso, wie dort wurde auf das Elektrometer (mit dem daranhängenden Kontakt) durch Influenz eine bestimmte Elektrizitätsmenge gebracht. Um unter Benutzung des Kugelkondensators die gleiche Elektrizitätsmenge zu erhalten, brauchte man nur an diesen eine niedrigere Spannung anzulegen. Diese honnte aber auch durch Rechnung gefunden werden, da sich die Elektrometerausschläge wie die an I (Fig. 5) angelegten Potentiale verhielten (vgl. Tab. p. 23,); mit anderen Worten: Wenn man bei einem bestimmten Kontaktabstand (für den die Kapazität zu bestimmen war) unter Benutzung einer Spannung V' eine Elektrizitätsmenge $V'C'$ (C' ges. Kontaktkapazität) auf das Elektrometer gebracht hatte, so war diejenige Spannung V zu suchen, welche das gleiche unter Benutzung der Kapazität $C = 97$ cm (Kugelkondensator) ermöglichte. Die beiden Elektrizitätsmengen waren dann also einander gleich, so daß aus $C'V' = CV$ die gesuchte Kontaktkapazität C' gefunden werden konnte. Für verschiedene Kontaktabstände variierten demnach nur die anzulegenden Spannungen. Die Elektrometerkapazität war innerhalb der zur Bestimmung benutzten Ausschläge konstant. Für verschiedene Kontaktabstände ergaben sich die Kapazitätswerte wie folgt:

Kontaktabstand in $\mu\mu$ . . .	1680	1120	560	280	140	70	35	20
Kontaktkapazität in cm . .	5,1	5,8	6,6	7,3	8,1	8,8	9,9	12,7?

Fig. 7 zeigt vorstehende Werte in Kurvenform.

Vorstehende Kapazitäten sind die Mittelwerte aus vielen Bestimmungen; die Einzelwerte zeigten, selbst wenn die ganze Anordnung auseinandergenommen und wieder zusammengesetzt worden war, nur sehr geringe Abweichungen untereinander.

Auch für verschiedene Paare von Kontakten war die Differenz kaum merklich. Hieraus durfte geschlossen werden, daß die für die Kapazität hauptsächlich in Betracht kommenden Teile der Oberfläche — die auch für die Entladungen maßgebend waren — eine große Ähnlichkeit hinsichtlich der Krümmung besaßen, die natürlich durch eine gute Politur, in einer für den vorliegenden Fall notwendigen Größe, noch nicht bedingt zu sein brauchte. Durch absichtliche starke Neigung der Achsen der beiden Kontaktzylinderchen gegeneinander wurde

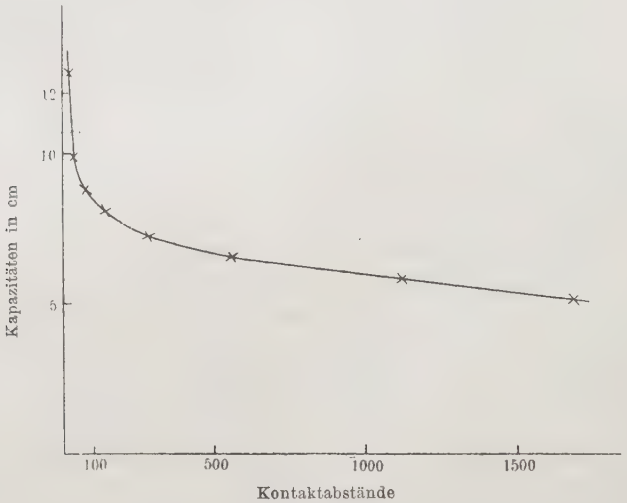


Fig. 7.
Abszissen: Kontaktabstände in $\mu\mu$.
Ordinaten: Kapazitäten in cm.

festgestellt, daß nur die, der gemeinschaftlichen Achse (Fig. 6) unmittelbar benachbarten Teile der Kontaktoberflächen die Kapazität des Systems bedingten. Dasselbe ging daraus hervor, daß die Kapazität sich nicht merklich änderte, wenn man die Randpartien der einander gegenüberstehenden, sphärischen Flächen mit einem festen Dielektrikum abdeckte.

Die Metallfassungen, in welchen die Bernsteinplatten mit den Kontakten saßen, bestanden aus einer massiven Grundplatte und einem, durch Schrauben darauf zu befestigendem Ring. Durch diesen letzteren wurden die Bernsteinplatten

gegen die Metallplatte gepreßt. Diejenige bei K 1 (Fig. 1) war durch je drei kräftige Zug- und Druckschrauben an dem rechtwinkligen Gußstück befestigt; mittels der Schrauben konnte eine Justierung der Platte und des daran sitzenden Kontaktes bewerkstelligt werden. Diese war genügend richtig, wenn die einander gegenüberstehenden Ränder der Kontakte (Fig. 6) in allen Punkten gleichen Abstand hatten. Die Kontrolle erfolgte durch Ausmessen des Abstandes nach zwei Richtungen gegen einen hellen Hintergrund mit einem Fernrohr und Okularmikrometer. Da es sich aus später mitzuteilenden Gründen als notwendig erwies, die Kontakte gegen das Kasteninnere abzuschirmen, so wurden dieselben mit einem Stanniolschutz umgeben, der durch straffes Aufwickeln eines entsprechend breiten Stanniolstreifens über die etwas aus der Metallfassung vorstehenden Bernsteinplatten (bei K Fig. 1) hergestellt wurde. Der dadurch entstehende Hohlraum kommunizierte genügend mit dem Kasteninnern.

Aus der Größe der Kontaktkapazität in den in Betracht kommenden Abständen hätte sich natürlich die Anwendung eines Elektrometers mit kleinerer Kapazität als praktisch ergeben. Da jedoch das benutzte in allen Fällen ausreichend, bei sehr kleinen Kontaktabständen aber von Vorteil war, so wurde dasselbe beibehalten.

Es dürfte an dieser Stelle nicht ohne Interesse sein, einiges über Versuche mitzuteilen, bei denen Metallspiegel auf Glas als Kontakte benutzt wurden, um so mehr, als, wie eingangs erwähnt, von R. W. Wood ähnliche Untersuchungen angestellt sind.

Die von mir benutzten Glaslinsen hatten einen Krümmungsradius von 125 m und bestanden aus einem Spezialglas, das sehr geringen Ausdehnungskoeffizienten hatte. Auf ihnen wurde durch Kathodenzerstäubung ein Iridiumspiegel niedergeschlagen, der außerordentlich fest haftete. Die dabei benutzte Zerstäubungstechnik wurde an anderer Stelle[1]) bereits mitgeteilt. Fig. 8 zeigt Auf- und Grundriß der benutzten Linsen; die gekrümmte Fläche hatte einen Durchmesser von 3 cm und nahe am Rand eine durchgehende Bohrung. Der

1) F. Rother, Ber. d. k. sächs. Ges. d. Wiss. 1912, p. 5.

Rand der Linsen war, wie ersichtlich, etwas angeschliffen. Stellte man die Spiegel einander so gegenüber, daß die angeschliffenen Stellen um 90^0 gegeneinander verdreht waren, so war an der, der angeschliffenen Stelle gegenüberliegenden Platte ein entsprechender Teil des Spiegels freigelegt, so daß hier die Zuleitungen angebracht werden konnten. Dies erfolgte entweder durch Löten, oder es wurde versucht, dünnes Blech unter Stanniolzwischenlage an die Spiegel mit Schräubchen, welche durch die an der freiliegenden Stelle befindlichen Bohrungen gingen, durch Anziehen einer Mutter anzupressen. Die Linsen waren ganz so, wie die Bernsteinplatten am Interferometer angebracht. Die Justierung konnte natürlich mit Hilfe der Newtonschen Ringe ausgeführt werden, wobei der Spiegelbelag an der Grenze der Durchsichtigkeit war. Die Abstände wurden jedoch mit der Interferometeroptik gemessen, da die Newtonschen Ringe infolge aller möglichen Störungen in dieser Hinsicht kein einwandfreies Arbeiten gestatteten, besonders, wenn es sich um Abstände unter $^1/_2$ Wellenlänge handelte.

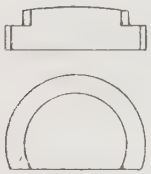


Fig. 8.

Die nötige Spannung wurde von einem Widerstand abgezweigt; diese Stromquelle, Kontakte und ein Galvanometer nach Deprez-D'Arsonval wurden in Reihe geschaltet. Ein bei äußerst geringer, angelegter Spannung eintretender Strom zeigte die metallische Berührung der Platten und damit den Abstand 0 an. Bei Versuchen in Luft war nun ein scheinbarer Stromübergang bis zu einem Plattenabstand von etwa 1 Wellenlänge unter Benutzung von 1—4 Volt zu konstatieren; im Vakuum verminderte sich der Abstand, bei dem noch Übergang stattfand auf ca. 50 $\mu\mu$. Diese Grenzwerte waren für verschiedene Spiegel (gleiches Metall) verschieden; auch schien Strom auf immer größere Entfernungen überzugehen, je öfter der Nullpunkt bestimmt, die Platten also zu metallischer Berührung gebracht worden waren. Wenngleich dies mit größter Vorsicht geschah, so mußte man doch aus den Erscheinungen schließen, daß dabei winzige Metallpartikelchen sich loslösten, die dann eine Brücke von großem Widerstand zwischen den Spiegeln bildeten und so eine Entladung vor-

täuschten. Die Erniedrigung der Entladungsstrecke durch Evakuieren schien außerdem auf das Vorhandensein von sehr kleinen Staubteilchen hinzudeuten, die natürlich mit abnehmendem Abstand eine immer größere Rolle für den Stromübergang spielten. Bei einem und demselben Versuch änderte sich der Strom äußerst regelmäßig mit dem Abstand, so daß man sehr schöne Kurven erhalten konnte (ähnliche Beobachtungen machte R. W. Wood). Bei einem bestimmten Abstand riß jedoch der Strom plötzlich ab: reproduzierbar war die Erscheinung in keinem Falle. Es zeigte sich unter dem Mikroskop, daß die Spiegel an den Berührungsstellen — eben infolge wiederholter Nullpunktbestimmungen — eine Aufrauhung der Schicht erfahren hatten. Iridiumspiegel waren von allen untersuchten Edelmetallen einer solchen Zerstörung noch am wenigsten ausgesetzt. Diese Erscheinungen traten sowohl bei schwach durchsichtigen als auch sehr dicken Spiegeln auf. Bei den ersteren wurde sehr oft eine Verzerrung der Newtonschen Ringe beobachtet, wenn bei der Nullpunktsbestimmung metallische Berührung eintrat. Eine Erklärung dafür kann einerseits in dem augenscheinlich bei den schwach gekrümmten Flächen nicht vollkommen zu beseitigenden Staub und anderseits in einer Unebenheit der Metallschicht gesucht werden. In einem einzigen Falle gelang es anscheinend, die Spiegeloberfläche so rein zu bekommen, daß der Strom nur unterhalb von ca. 20 $\mu\mu$ überging; ob diese Erscheinung andere Ursachen, als eine Störung durch Fremdkörper hatte, war nicht zu entscheiden, da unterhalb des betreffenden Abstandes nicht mehr gemessen werden konnte. Aus allen diesen Versuchen ging mit großer Sicherheit hervor, daß es unmöglich ist, mit sehr schwach gekrümmten Flächen Aufschlüsse über die gesuchten Vorgänge zu erhalten. R. W. Wood teilte mit, daß er mit solchen Spiegeln Stromübergang bei Abständen bis zu 28 Wellenlängen unter Anlegung von sehr geringen Spannungen erhalten habe; diese Erscheinungen waren offenbar ebenso durch Störungen beeinflußt, wie die oben geschilderten. Aus den hier mitzuteilenden Resultaten geht hervor, daß ein Stromübergang über den großen, von Wood angegebenen Abstand, mit jener geringen Spannung ganz unmöglich ist.

Es wurden noch weitere Versuche angestellt mit Glas-

kügelchen von 5 mm Durchmesser, die ebenfalls mit Iridium kathodisch überzogen waren. Bei dieser Krümmung ist es möglich, den Staub genügend zu beseitigen, und so schien auch bei Abständen von ca. 20 $\mu\mu$ ein Stromübergang vorhanden zu sein; da aber auch hier die oben geschilderten Fehlerquellen durch die Nullpunktsbestimmung vorhanden waren und der beobachtete Effekt — soweit die definitiven Werte mit dem vorliegenden Fall verglichen werden dürfen — unterhalb der Galvanometerempfindlichkeit lag, so konnte aus den beobachteten Erscheinungen nichts Zuverlässiges abgeleitet werden. Bei den erwähnten Erscheinungen bei sehr kleinen Abständen können außerdem an der Spiegeloberfläche adhärierende, sehr dünne Gasschichten eine Rolle spielen; besonders bei den, durch Kathodenzerstäubung erhaltenen Metallspiegeln ist diese Möglichkeit um so weniger von der Hand zu weisen, wenn es sich um Metalle der Platingruppe handelt, bei denen immer Spuren von Gasen in irgend einer Form vorhanden sind. Über das Vorhandensein solcher Schichten an polierten Metalloberflächen wird später die Rede sein.

Für andere eingehende Versuche dienten als Kontakte dieselben Glaslinsen, nur waren dieselben nicht auf der ganzen Oberfläche mit Metall bedeckt, sondern es wurden 1 mm breite, radiale Iridiumstreifen kathodisch niedergeschlagen; für den Versuch wurden die Linsen dann so justiert, daß sich die Streifen kreuzten. Diese letzteren gingen radial über die ganze Linse, und zwar parallel zur abgeschliffenen Kante (Fig. 8), und endeten bei der Bohrung. Auch diese Methode lieferte keine vertrauenswürdigen Resultate, da beim Bestäuben an der Grenze: Iridium-Glas immer ein Grat an der Linsenoberfläche entstand, der nicht genügend sauber beseitigt werden konnte. Die Linse war beim Bestäuben mit einer sehr dünnen Aluminiumschablone bedeckt, die einen Ausschnitt von der Größe des gewünschten Streifens hatte. Ein Versuch, den Spiegelbelag einfach durch Abwischen teilweise zu beseitigen mißlang, da das Metall sehr fest auf der Glasoberfläche haftete. Es zeigte sich bei diesen Versuchen, daß das Glas der Linsen nicht ausreichend isolierte. An der unbelegten Glasoberfläche waren anscheinend sehr dünne Feuchtigkeitshäutchen vorhanden, die auch durch Trockenmittel nicht zu beseitigen waren.

Diese, mit Metallspiegel auf Glaslinsen gemachten Erfahrungen waren Veranlassung, zu polierten Metallen überzugehen. Benutzt wurden dieselben in der beschriebenen Form; außerdem wurden auch einige Versuche mit Spitze und einer sphärischen Fläche angestellt. Durch eine sehr starre Montierung der Kontakte wurde einer anderweitig (allerdings bei höheren Spannungen) beobachteten Erscheinung vorzubeugen versucht, daß nämlich eine Annäherung der Kontakte durch elektrische Kräfte erfolgt, ohne daß der Schlitten mitgeht. Diese Bemühung war auch von Erfolg begleitet, indem derartige Erscheinungen bei meßbaren Entfernungen mit den benutzten Spannungen nie beobachtet wurden. Bei Abständen unter 20 $\mu\mu$ konnten manchmal optisch nicht mehr wahrnehmbare Schlittenverschiebungen durch die elektrischen Vorgänge erkannt werden. Da diese Erscheinungen jedoch nicht immer auftraten, so konnten sie nicht von elektrischen Kräften herrühren. Es ist vielmehr wahrscheinlich, daß die schon früher besprochenen, elastischen Nachwirkungen dabei eine Rolle spielten. Derartige Beobachtungen waren natürlich von den Resultaten ausgeschlossen.

III. Die Entladungserscheinungen.

Bei den ersten Versuchen bestanden die Kontakte aus Nickelstahl, der wegen seiner guten Polierfähigkeit benutzt wurde. Es stellte sich jedoch im Laufe der Untersuchung heraus, daß notwendigerweise nur chemisch reine Metalle in Betracht kommen konnten; deshalb wurden die Messungen mit Iridium und Gold ausgeführt, die als chemisch rein von Heraeus und der deutschen Gold- und Silberscheideanstalt bezogen waren. Iridium erwies sich als hervorragend polierfähig, während es bei dem sehr weichen Gold zunächst unmöglich erschien, eine brauchbare Politur zu erzielen. Durch einen gelegentlichen Versuch wurde jedoch festgestellt, daß mit feinstem Smirgelpapier (0000) eine erste Hochglanzpolitur erreicht werden konnte, wenn man nur zwischen Schleifschale und das darin liegende Smirgelpapier ein festes, aber weiches Leder legte; ohne dieses schmierte das Gold und bekam keinen Hochglanz. Das Polierverfahren war sonst das gleiche, wie eingangs ge-

schildert. Dieses trockene Polieren war sehr zeitraubend, da Öl aus noch mitzuteilenden Gründen nicht benutzt werden durfte. Da es nicht möglich war, an Iridium- und Goldkontakte ein Gewinde zu schneiden, das eine genügend starre Befestigung ermöglicht hätte, so wurden diese auf Messing hart aufgelötet und mit einem, an diesem befindlichen Gewinde in die Kontaktträger eingeschraubt.

Die Messungen wurden, um Störungen durch zufällige Erschütterungen möglichst aus dem Wege zu gehen, des Nachts vorgenommen; man hatte dabei den Vorteil einer sehr konstanten Temperatur, die bei allen Versuchen 18,5° C betrug. Das Laboratorium lag im Sockelgeschoß. Diese Temperaturkonstanz ermöglichte auch ein sehr angenehmes Arbeiten mit dem Elektrometer.

Die nötigen Vorbereitungen für die Messungen wurden vormittags getroffen. Nachdem die Kontakte fertiggestellt und in das Interferometer eingesetzt waren, wurde der Eisenkasten sofort geschlossen und einige Stunden dauernd evakuiert; inzwischen konnten die nötigen Verbindungen mit dem Elektrometer hergestellt werden. Bei wiederholtem Zusammensetzen der Anordnung differierte die Nullstellung des Elektrometers im schlimmsten Falle um 2 Skalenteile, während der Messungen, die gewöhnlich 4 bis 5 Stunden lang fortgesetzt wurden, sogar nur um 0,5. Wurde die Pumpe abgestellt, so füllte sich der evakuierte Kasten in ca. 6 Stunden wieder mit Luft bis ziemlich auf Atmosphärendruck. Das vorherige Evakuieren war auch für Versuche in Luft unbedingt notwendig; unterblieb dasselbe, so erhielt man alle möglichen Erscheinungen, die nicht reproduziert werden konnten. Durch das Evakuieren wurde in jedem Falle erreicht, daß Störungen durch irgend welche Fremdkörper nur außerordentlich selten vorkamen. Dieselben machten sich übrigens sofort durch sehr grobe Unregelmäßigkeiten in den Elektrometerausschlägen leicht erkennbar.

Eine eigentümliche Art von Störungen, die immer auftrat, wenn nach dem Einsetzen neuer Kontakte nicht evakuiert, sondern sofort gemessen wurde, war folgende. Es wurde bei neu polierten Kontakten unter diesen Umständen regelmäßig eine Verzögerung der Entladung beim Anlegen eines Potentials

beobachtet. Aus der folgenden Tabelle ist das Zahlenmäßige dieser Erscheinung zu entnehmen.

Angelegte Spannung	Beginn der Auflad. nach	Ausschl. nach weit. 10 Sek.	Kontaktabst.
21,3 Volt	40 Sek.	20 Sktl.	280 $\mu\mu$
9,7 „	30 „	15,4 „	140 „
9,7 „	20 „	13,4 „	140 „
4,6 „	35 „	11,2 „	140 „

Diese Erscheinungen waren vollkommen unregelmäßig und in keinem Falle reproduzierbar; im allgemeinen konnte nur festgestellt werden, daß die Verzögerungsdauer mit der Häufigkeit der Versuche abnahm und schließlich verschwand. Diese Störungen traten nicht auf, wenn, wie oben erwähnt, längere Zeit vor Beginn der Versuche evakuiert wurde; brachte man jedoch die Kontakte aus dem Vakuum an die Luft und ließ sie einige Tage frei liegen, so wurden die störenden Erscheinungen wieder beobachtet. Durch sehr langes Liegen an der Luft wurden die Kontakte für die Entladungsversuche überhaupt unbrauchbar. Eine Erklärung für die geschilderten Erscheinungen ist wahrscheinlich darin zu suchen, daß sich an der Kontaktoberfläche ein Luft- oder auch Feuchtigkeitshäutchen befindet, das durch dauerndes Evakuieren so weit beseitigt werden kann, daß meßbare Unregelmäßigkeiten in der Entladung nicht mehr auftreten. Die Entladungsversuche mißlangen vollständig in einer Atmosphäre von Öldampf; die ersten orientierenden Versuche waren unter solchen Bedingungen angestellt, indem das feine Öl, das sich in geringen Mengen am Interferometer befand, beim Evakuieren verdampfte. Diese Störung wurde vollkommen beseitigt durch einen Stanniolschutz, der einen Hohlraum von 5 cm Durchmesser und 3 cm Länge mit den darin befindlichen Kontakten einschloß. In diesem Raum gingen die eigentlichen Entladungserscheinungen vor sich. Durch diese Anordnung wurde ein ausgezeichneter Staubschutz geschaffen, so daß, nachdem einmal evakuiert war, auf Staub zurückzuführende Störungen nicht mehr vorkamen; in diesem Sinne konnte die Staubfrage als gelöst betrachtet werden.

Der stets innegehaltene Gang der definitiven Messungen war folgender: Nachdem durch einige Vorversuche die Ab-

wesenheit der oben geschilderten Oberflächenstörungen durch Feuchtigkeit usw. dargetan war, wurden die Kontakte unter Anlegung eines Potentials von etwa 0,03 Volt einander sehr langsam genähert; bei metallischer Berührung erfolgte eine sofortige, d. h. der Schwingungsdauer der Elektrometernadel entsprechende Aufladung des Elektrometers. Diese Kontaktstellung wurde nach mehrmaliger Nachprüfung als Nullpunkt genommen; diese Nullpunktlage konnte mit einer Genauigkeit von $^1/_{80000}$ mm entsprechend einem halben Teilstrich der Kreisteilung an der Feinbewegungsschraube reproduziert werden, sofern die Temperatur genügend konstant war. Eine Nachprüfung fand stets vor und nach jedem Entladungsversuch statt. Mußten die Versuche auf einige Zeit unterbrochen werden, so erwies es sich als günstig, die Kontakte auf die Nullstellung, also eben zu metallischer Berührung zu bringen. Wurde nun ein bestimmter Kontaktabstand eingestellt und an den Kontakt *K2* (Fig. 1) ein bestimmtes Potential angelegt, so erfolgte über die Trennungsstrecke hinweg eine allmähliche Aufladung des Elektrometers bis zu einem, dem angelegten Potential entsprechenden Höchstbetrag. Gemessen wurde die Zeitdauer einer Aufladung des Elektrometers, die einem Skalenausschlag von 20 mm entsprach. Dieser Ausschlag war in jedem Falle klein gegenüber demjenigen, der der gleichen, direkt an das Elektrometer gelegten Spannung entsprach. Für die Wahl dieses 20 mm-Ausschlages waren maßgebend die Konstanz der Elektrometerkapazität und die nicht zu lange Zeitdauer einer Aufladung, durch welche natürlich die Möglichkeit einer Änderung des Kontaktabstandes während der Messung vermindert wurde. Die zu den Messungen benutzte Stoppuhr war mit der Pendeluhr des Instituts verglichen worden; die kleinsten gemessenen Zeiten dürften mit kleinen Fehlern behaftet sein, die auch in den Messungen zum Ausdruck kommen; diese Werte liegen jedoch auch an der Grenze der optischen Meßgenauigkeit und sind in den Tabellen mit einem Fragezeichen (?) versehen. Die im folgenden zahlenmäßig wiedergegebenen Erscheinungen waren bei Atmosphärendruck und in einem Vakuum von etwa 1 mm nicht meßbar verschieden; auch waren die Werte gleich für das positive und negative Vorzeichen der angelegten Spannung. Nach erfolgter Neu-

politur der Platten waren die Werte mit einer Genauigkeit von 2—3 Proz. reproduzierbar.

Tabelle 1 gibt die für 2 gleiche Iridiumkontakte von der in Fig. 6 abgebildeten Form gemessenen Zeiten, in denen bei der angegebenen Spannung ein Auschlag von 20 mm erreicht wurde.

Tabelle I.

Angelegte Spannung	Kontakt-abstand	Zeit in Sekunden für Ausschlag von 20 mm
4,61 Volt	280 $\mu\mu$	374; 382; 376; 384; 380; 379; 380; 378; 384; 380; Mittel: **379,7**
	140 „	126; 125; 128; 128; 125; 125; 126; Mittel: **126,1**
	70 „	43; 42,4; 41,8; 42,2; 43,0; 41,6; 42,2; Mittel: **42,3**
	35 „	14,6; 14,8; 14,6; 15,0; 15,0; 14,8; Mittel: **14,4**
	20 „	5,4; 5,6; 5,6; 5,2; 5,8; 5,6; Mittel: **5,6**
2,78 „	140 „	209; 212; 211; 210; 209; 211: 210; 209; Mittel: **210,1**
	70 „	68; 70; 70; 68; 73; 73; 70; 72; 72; 70; Mittel: **70,6**
	35 „	23; 25; 24; 23; 23; 25; 25; 23; Mittel: **23,9**
	20 „	8,0; 8,2; 8,2; 8,2; 8,0; 8,2; 8,0; Mittel: **8,1**
1,59 „	70 „	121; 122; 120; 120; 118; 118; 122; 120; 120; Mittel: **120,1**
	35 „	40,8; 41,0; 41,0; 42,0; 42,0; 40,0; 40,0; Mittel: **40,9**
	20 „	14,4; 14,4; 14,8; 14,8; 14,6; 14,6; 14,4; 14,4; Mittel: **14,3**
0,81 „	70 „	220; 240; 242; 235; 245; 232; 233; 232; Mittel: **232,3**
	35 „	80; 81; 80; 83; 82; 81; 81; 82; Mittel: **81,2**
	20 „	27,0; 27,0; 30,0; 28,2; 28,4; 28,4; Mittel: **28,2**

Die analogen Werte für zwei gleiche, sphärische Goldelektroden sind in der folgenden Tabelle II mitgeteilt:

Tabelle II.

Angelegte Spannung	Kontaktabstand	Zeit in Sekunden für Ausschlag von 20 mm
4,61 Volt	560 $\mu\mu$	110; 112; 111; 108; 114; 111; 110; 112; 111; Mittel: **111,1**
	280 „	34,0; 34,8; 35,0; 33,6; 33,0; 34,2; 33,8; 33,0; 33,0; Mittel: **33,8**
	140 „	12,6; 12,4; 13,0; 12,2; 12,0; 12,0; 13,0: 12,8; 12,4; Mittel: **12,7**
	70 „	4,6; 4,6; 4,8; 4,8; 4,8; 4,4; 4,4; 4,6; 4,4; 4,6; Mittel: **4,6**
	35 „	1,8; 1,6; 1,6; 1,2; 1,4; 1,4; 1,6; 1,6; Mittel: **1,5**
	20 „	etwa 0,8 ? ? ?
2,78 „	560 „	187; 188; 187; 186; 187; 185; 185; 185; 186; Mittel: **186,2**
	280 „	63; 62; 62; 64,2; 64,2; 62; 63; 63; Mittel: **62,7**
	140 „	19,8; 21,0; 20,4; 22,0; 21,0; 21,0; Mittel: **20,9**
	70 „	6,8; 6,8; 6,8; Mittel: **6,8**
	35 „	2,4; 2,4; 2,6; 2,4; 2,2; 2,2; Mittel: **2,3**
	20 „	1,2; 1,2; 1,0; 1,0; 1,2; Mittel: **1,1**
1,59 „	280 „	112; 113; 110; 113; 114; 112; 112; 113; 113; Mittel: **112,4**
	140 „	35; 36; 33; 33; 33; 36; 33; 35; 34; Mittel: **34,2**
	70 „	11,8; 12,0; 12,0; 12,4; 12,0; 12,0; Mittel: **12,0**
	35 „	4,2; 3,8; 3,6; 3,6; 4,0; 4,0; Mittel: **3,8**
	20 „	1,2; 1,2; 1,6; 1,6; 1,2; 1,4; 1,4; 1,2; Mittel: **1,3**
0,81 „	140 „	70; 71; 70; 68; 69; 67; 71; 68; 69; Mittel: **69,2**
	70 „	22,8; 23,4; 22,6; 23,0; 23,0; 23,2; 22,8; Mittel: **22,9**
	35 „	7,6; 8,0; 8,4; 7,8; 7,8; 7,8; 8,0; Mittel: **7,9**
	20 „	3,0; 2,6; 2,6; 2,8; 2,8; 2,6; 2,8; Mittel: **2,7**

Es wurden ferner Versuche angestellt mit einer der oben benutzten, sphärischen Iridiumplatten und einer gegenüberstehenden Iridiumspitze. Die hier mitgeteilten Mittelwerte sind ganz so, wie die oben angeführten erhalten. Die schon geschilderten, anfänglichen Störungen bei frisch polierten Platten wurden bei Spitze und Platte in weit geringerem Maße beobachtet, doch war immerhin auch ein erstmaliges Evakuieren nötig, um regelmäßige Entladungen zu erhalten. Tabelle III gibt die für Iridiumplatte und Spitze erhaltenen Werte wieder.

Tabelle III.

Angelegte Spannung	Kontaktabstände in $\mu\mu$ 140	70	35	20	
4,61 Volt	126	40,8	14,2	5,2	Mittel aus den Entladezeiten
2,78 „	213,(8)	74	23,6	8,5	
1,59 „		123,3	41,6	14,6	
0,81 „		etwa 232?	84	25 ?	

Mit sämtlichen Iridiumkontakten wurden noch Versuche mit einer Spannung von 9,72 Volt angestellt, welche vollkommen analoge Werte ergaben; dieselben sind in den später folgenden Kurven mit enthalten.

Da die Kapazität des Elektrometers und der Kontakte bekannt war, so konnten unter Benutzung der oben gemessenen Zeiten die übergehenden Ströme in bekannter Weise berechnet werden. Zur Berechnung der Stromwerte für sphärischen Iridiumkontakt und Spitze wurde nur die in Betracht kommende Elektrometerkapazität von 77,6 cm benutzt, da für dieses Kontaktsystem die Kapazität kleiner als ein Zentimeter war, und deshalb gegenüber der Elektrometerkapazität nicht in Betracht kam. Dem Elektrometerausschlag von 20 mm, für welchen die Aufladezeiten gemessen wurden, entsprach eine Spannung von 0,0235 Volt. In den folgenden Tabellen sind die aus den Messungen berechneten Stromwerte wiedergegeben.

Tabelle IV.

Stromwerte für die beiden sphärischen Iridiumkontakte ($r = 175$ mm).

Angelegte Spannung		Kontaktabstände in $\mu\mu$ 280	140	70	35	20
9,72 Volt	Ströme in Amp. $\times 10^{-14}$	1,2(3)	3,7(8)	10,90	33,2(6)	84,20
4,61 „		0,5(8)	1,7(8)	5,3(3)	15,9(4)	42,1(2)
2,78 „		0	1,06	3,1(9)	9,60	29,1(1)
1,59 „		0	0	1,6(9)	5,6(1)	16,9(4)
0,81 „		0	0	0,9(7)?	2,8(2)	8.3(6)

Tabelle V.

Stromwerte für einen sphärischen Iridiumkontakt und Iridiumspitze.

Angelegte Spannung		Kontaktabstände in $\mu\mu$ 280	140	70	35	20
9,72 Volt	Ströme in Amp. $\times 10^{-14}$	1,1(1)	3,3(1)	9,8(7)	31,1(7)	84,4(2)
4,61 „		0	1,6(1)	4,9(6)	14,2(6)	38,9(5)
2,78 „		0	0,9(5)	2,7(3)	8,5(8)	23,8(3)
1,59 „		0	0	1,6(4)	4,8(7)	13,8(8)
0,81 „		0	0	0,8(6)	2,4(2)	8,10

Endlich ergaben sich für zwei sphärische Goldkontakte die in Tabelle VI zusammengestellten Stromwerte.

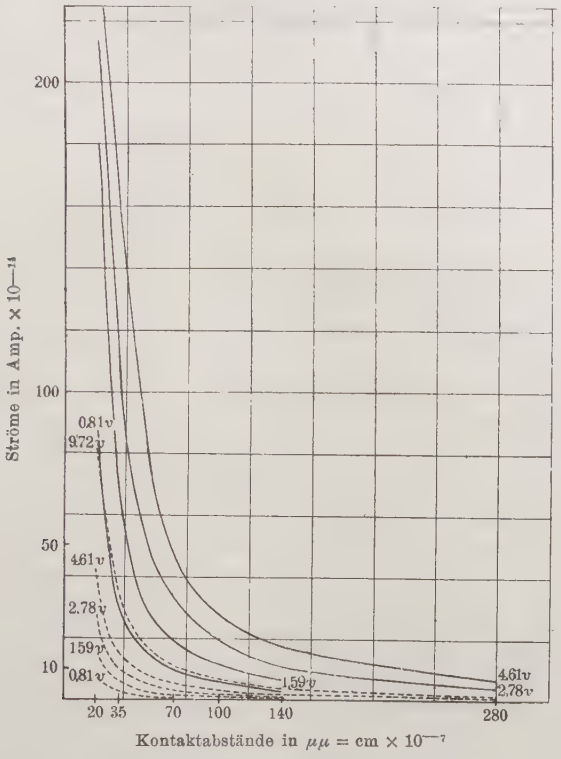
Tabelle VI.

Stromwerte für zwei sphärische Goldkontakte ($r = 175$ mm).

Angelegte Spannung	Kontaktabstände in $\mu\mu$ 560	280	140	70	35	20	
4,61 Volt	1,97	6,55	17,62	46,03	153,01	249,7?	Stromwerte in Ampère $\times 10^{-14}$
2,78 „	1,18	3,53	10,70	33,20	99,79	214,3?	
1,59 „	0	1,97	6,54	18,80	60,39	181,37	
0,81 „	0	0	3,23	9,85	29,05	87,32	

Mit den geringeren Spannungen wurden für beide Metalle keine Entladungserscheinungen mehr in den größeren Abständen beobachtet; in den Tabellen sind diese Stellen mit 0 bezeichnet. Es wurden zwar bisweilen unter diesen Bedingungen Stromübergänge festgestellt, jedoch waren hierfür außerordentlich lange Entladezeiten nötig, so daß bei der Kontrolle

des Abstandes stets eine Verkleinerung desselben vorgefunden wurde. Bei einwandfrei definierten Abständen fand jedenfalls bei den in den Tabellen mit 0 bezeichneten Stellen kein Entladungsvorgang mehr statt. In Fig. 9 sind die oben mitgeteilten



Ordinate: Ströme in Amp. × 10^{-14}
Abszisse: Kontaktabstände in $\mu\mu$
——— = Gold ------- = Iridium

Fig. 9.

Werte in Kurvenform dargestellt, und zwar für sphärische Gold- und Iridiumkontakte. Die Abszisse gibt die Kontaktabstände in $\mu\mu$, die Ordinate die übergehenden Ströme in Ampere × 10^{-14}. Am Anfang jeder Kurve steht die betreffende Spannung, mit welcher der durch die Kurve dargestellte Stromanstieg erhalten wurde.

IV. Die Auswertung der Messungen und die Elektronenatmosphären der Metalle.

Der ganze Verlauf der vorliegenden Untersuchung deutete darauf hin, daß der beobachtete Elektrizitätsübergang bei sehr kleinen Kontakttrennungsstrecken durch Metallelektronen bedingt ist. Die Möglichkeit eines Ionisationsvorganges war bei den sehr kleinen Abständen und den zum Teil sehr geringen Spannungen ausgeschlossen. Die beste Stütze fand die Erklärung des beobachteten Elektrizitätstransportes über die Trennungsstrecken in den quantitativen Messungen, welche für verschiedene Metalle verschiedene Stromwerte unter sonst gleichen Versuchsbedingungen ergaben.

In den am Eingang angeführten Arbeiten (p. 8), in welchen Entladungsversuche über sehr kurze Trennungsstrecken mit fast durchwegs höheren Spannungen (es wurden nur Entladungspotentiale bestimmt) beschrieben sind, wurde die Ansicht vertreten, daß die Elektronen an einer Metalloberfläche durch ein äußeres Feld befähigt würden, die Anziehung ihrer Spiegelbilder zu überwinden und so vom Metall fortzufliegen. Auf diese Weise kam man dazu, sich die Entladung unter den geschilderten Umständen ähnlich wie bei einer Kathode vorzustellen.[1]) Bei den vorliegenden Versuchen zeigte sich, daß für das Leitvermögen der zwischen den beiden Kontakten vorhandenen Elektronenatmosphären eine Art Ohmsches Gesetz gilt, d. h. daß dieses Leitvermögen unabhängig von Strom und Spannung ist. Inwieweit dies der Fall ist, zeigen die beiden folgenden Tabellen für Gold und Iridium. Sie enthalten die Quotienten aus Stromstärke und zugehöriger Spannung für einen gegebenen Abstand (aus den Stromkurven in Fig. 9). Wie aus den Tabellen ersichtlich, ist dieser Quotient mit großer Annäherung konstant. Es mag schon hier mitgeteilt werden, daß dieses „Ohmsche Gesetz“ für jeden Elektrodenabstand etwas andere Konstanten des Leitvermögens ergibt.

1) Thomson-Marx, Elektrizitätsdurchgang in Gasen. 1906. p. 408.

Tabelle VIIa.

(Siehe auch Tabellen IV und VI.)

Spannung	Werte von $\frac{i}{e}$ für Iridium (scheinb. Leitvermögen)				
	Kontaktabstände in $\mu\mu$				
	280	140	70	35	20
9,72 Volt	0,12	0.38	1,12	3,42	8,67
4,61 „	0,13	0,37	1,14	3,44	9,1
2,78 „	0	0,39	1,1	3,4	10,4
1,59 „	0	0,37	1,07	3,5	10,5
0,81 „	0	0	1,1	3,45	10,2

Tabelle VIIb.

Spannung	Werte von $\frac{i}{e}$ für Gold (scheinbares Leitvermögen)					
	Kontaktabstände in $\mu\mu$					
	560	280	140	70	35	20
4,61 Volt	0,42	1,2	3,8	9,9	33,2	54,1
2,78 „	0,42	1,2	3,7	11,5	34,8	74,6
1,59 „	0	1,2	4,0	12,0	38,0	113,3
0,81 „	0	0	4,0	12,1	35,8	107,0

Auf Grund der geschilderten Eigenschaft der Elektronenatmosphären ist es möglich, den Stromübergang in diesen Atmosphären wie einen Leitungsvorgang zu betrachten und das spezifische Leitvermögen für jeden Abstand in erster Annäherung zu berechnen. Das ermittelte Resultat darf infolge der auftretenden Schwierigkeit in der Behandlung natürlich nur als Größenordnung betrachtet werden. Diese Schwierigkeit besteht in der Berücksichtigung der Krümmung der Kontakte und der damit zusammenhängenden Definition des Querschnittes.

Aus den durch die Messungen erhaltenen Stromwerten p. 36) können zunächst die scheinbaren Widerstände und das scheinbare mittlere Leitvermögen abgeleitet werden (i = Stromstärke in Amp. $\times 10^{-14}$; e = angelegte Spannung). Diese Werte sind in der folgenden Tabelle wiedergegeben; es

sind die Mittel aus den, auf ähnliche Weise wie in Tab. VII gebildeten Einzelwerten.

Tabelle VIII.

Kontaktabstand	Iridium		Gold	
	Scheinbares Leitvermögen $\frac{i}{e}$	Scheinbarer Widerstand $\frac{e}{i}$	Scheinbares Leitvermögen $\frac{i}{e}$	Scheinbarer Widerstand $\frac{e}{i}$
560 $\mu\mu$			$0{,}42 \times 10^{-14}$	$2{,}3 \times 10^{14}$
280 „	$0{,}12 \times 10^{-14}$	$8{,}1 \times 10^{14}$	1,2	0,75
140 „	0,38	2,65	3,87	0,265
70 „	1,106	0,89	11,4	0,088
35 „	3,44	0,27	37,2	0,028
20 „	9,77	0,098	87,2	0,011

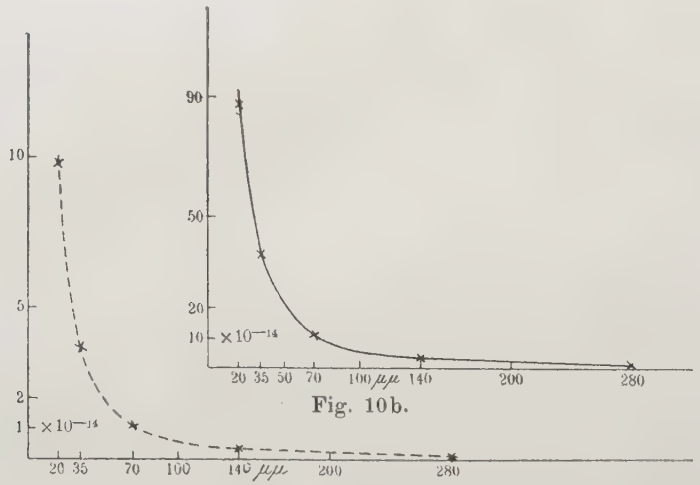


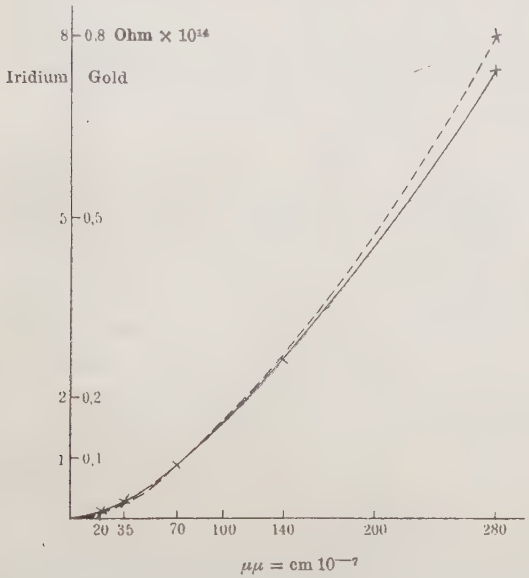
Fig. 10b.

Fig. 10a.

Abszissen: Kontaktabstand $2\,X_0$ in $\mu\mu = 10^{-7}$ cm
Ordinaten: Mittleres Leitvermögen $(i/e) \times 10^{-14}$
——— = Gold ------ = Iridium

Fig. 10 (a, b) zeigt die aus den vorstehenden Werten gewonnenen Kurven für das mittlere Leitvermögen i/e; Abszissen sind die Kontaktabstände in $\mu\mu$, Ordinaten die Werte für i/e.

Um nun eine Vorstellung über den Einfluß der Krümmung der Kontaktoberflächen auf den Leitungsvorgang zu bekommen, wurde folgende Überlegung angestellt. Zunächst wurden in Fig. 11 die aus den Beobachtungen ermittelten und aus Tabelle VIII entnommenen Werte für den Widerstand $w = e/i$ als Funktion des Kontaktabstandes dargestellt. Bedeutet nun



Abszissen: Kontaktabstände $2 X_0$ in $\mu\mu = 10^{-7}$ cm
Ordinaten: Widerstände $e/i = w$ in Ohm × 10^{14}
——— = Gold - - - - - - Iridium

Fig. 11.

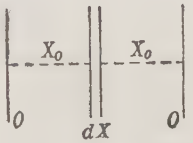


Fig. 12.

in Fig. 12 X_0 den halben Abstand der Kontaktoberflächen 0, so kennt man nach dem Vorigen den Widerstandszuwachs dw, der durch Auseinanderschieben der Oberflächen um das Stück dX eingeschaltet wird. Da ferner das Leitvermögen in bestimmter Höhe über der Kontaktoberfläche stets dasselbe ist, so kennt man auch den reziproken Widerstand l einer Säule von der Länge 1 cm und von unbegrenztem Querschnitt, in welchem dieselbe Verteilung des spezifischen Leitvermögens herrscht, wie in der Schicht dX. Das bedeutet aber, man kennt:

(1) $$l_{X_0} = \frac{1}{\frac{\partial W}{\partial X_0}} = \frac{\partial X_0}{\partial W}$$ für das betreffende X.

Nimmt man nunmehr *an*, daß das spezifische Leitvermögen L in der Schicht dX nahe der Achse proportional l sei, d. h. also, daß:

(2) $$L = C \cdot l$$

wo C = const., so erhält man für den reziproken Widerstand $1/r$ eines Zylinders vom Querschnitt 1, der von der Metalloberfläche bis zur Höhe X reicht:

$$\frac{1}{r} = K = \frac{C}{W_X}$$

wobei aus Fig. 11 der zu dem jeweiligen X gehörige Wert für W zu entnehmen ist. Die Bedeutung von X erhellt aus

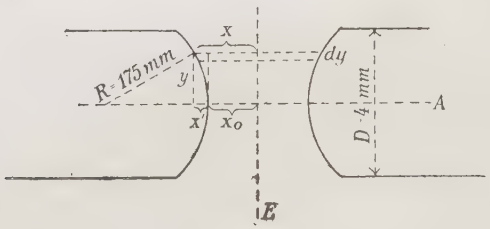


Fig. 13.

Fig. 13. Es sind dort die beiden Kontakte abgebildet, deren sphärische Flächen einander gegenüberstehen. Mit D ist der Durchmesser der Kontakte bezeichnet, mit A deren gemeinschaftliche Achse, während R den Krümmungsradius (175 mm) der sphärischen Flächen bedeutet. Durch E ist die Stelle angedeutet, an welcher in Fig. 12 die Schicht dX eingeschaltet wurde und von welcher aus X und X_0 gerechnet werden.

Der reziproke Widerstand $1/W = i/e$ wird nun offenbar:

(3) $$\frac{i}{e} = \int_q K \cdot df \qquad \left(K = \frac{C}{W_X};\ q = \text{Querschnitt}\right)$$

wobei, wie aus Fig. 13 deutlich wird, $df = 2\pi y \cdot dy$ zu setzen ist. Für W ist aus Fig. 11 derjenige Widerstand zu nehmen, der einem $X = X_0 + X'$ (Fig. 13) entspricht, wobei

$$X' = \frac{y^2}{2R}.$$

Setzt man nun noch den Wert für df und K in die letzte Gleichung (3) ein und löst nach C auf, so erhält man endlich:

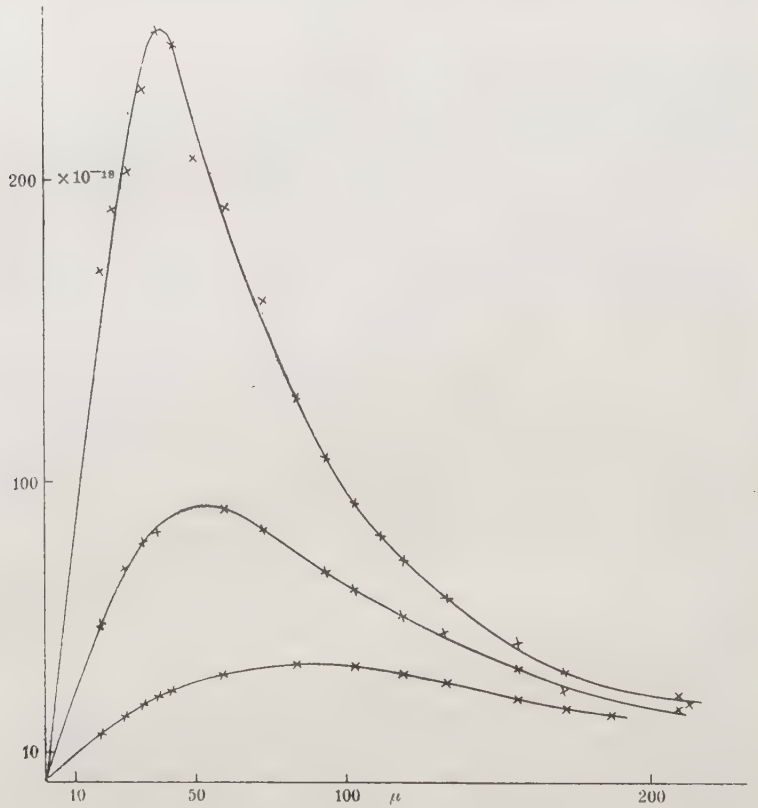
$$C = \frac{\frac{i}{e}(X_0)}{2\pi \int \frac{y \cdot dy}{W_X}} \quad . \tag{4}$$

Der Wert für $i\,e$ ist dabei für den betreffenden Elektrodenabstand X_0 aus den Kurven in Fig. 10 zu entnehmen. Das Integral in Gleichung (4) ist durch Planimetrieren auszuwerten. Zu diesem Zweck wurden in einem Koordinatensystem die in der folgenden Tabelle 9 wiedergegebenen y als Abszissen und die Werte von y/W als Ordinaten aufgetragen. Die nachstehende Tabelle 9 zeigt an einem Beispiel die Durchrechnung für Iridium, und zwar für einen Abstand $X_0 = 10\ \mu\mu$. Die Bedeutung der einzelnen Zahlenreihen ist unmittelbar aus der Tabelle ersichtlich. Zunächst wurden die Werte für X gebildet, wobei mit einem kleinen X' begonnen wurde (vgl. Fig. 13). Aus den Werten für X wurden dann diejenigen für y abgeleitet nach der Beziehung $y = \sqrt{2\,R\,X}$ (vgl. Fig. 13). Nun konnte man auch noch y/W_X bilden, wobei aus Fig. 11 der $2X$ entsprechende Wert für W zu nehmen war.

Tabelle IX.

$X = X_0 + X'$	$y = \sqrt{2\,R\,X}$	W_X	$\frac{y}{W_X}$
11×10^{-7} cm	$18{,}7 \times 10^{-4}$ cm	$0{,}11 \times 10^{14}$ Ohm	170×10^{-18}
11,5	22,9	0,12	191
12	26,4	0,13	203
13	32,4	0,14	231
14	37,4	0,15	250
15	41,8	0,17	246
20	59,1	0,31	190
25	72,4	0,46	160
35	93,5	0,86	108
50	118,3	1,62	73
80	156,5	3,35	46
100	171,7	4,75	36
130	209,7	7,2	29
140	213,3	8,1	26

Aus diesen Tabellenwerten ergaben sich dann, wie schon beschrieben, die in Fig. 14 (a, b) wiedergegebenen Kurven, die noch zu planimetrieren waren, um den Wert für C aus Gleichung (4) zu erhalten. Für jede dieser Kurven wurden



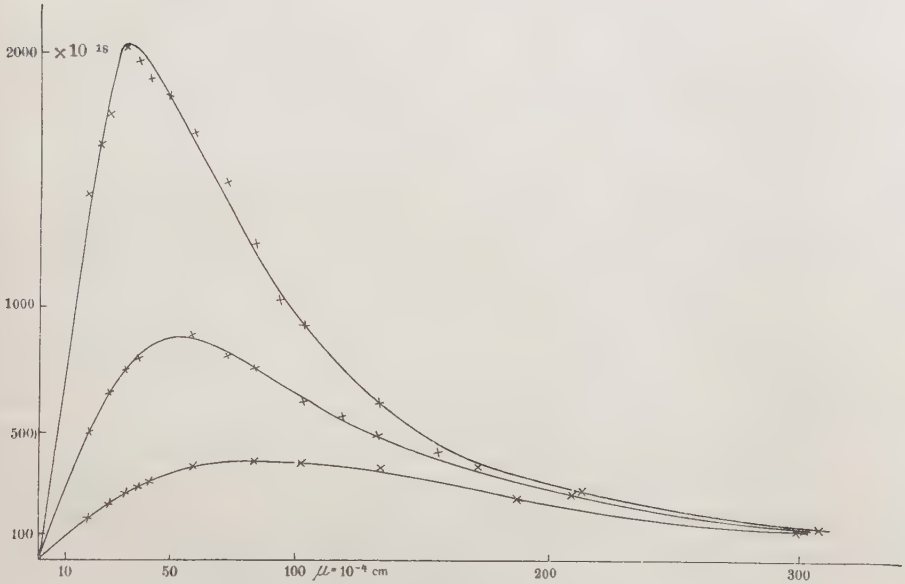
$\mu = 10^{-4}$ cm

Abszisse: y in μ (Abst. von der Achse)
Ordinate: y/W_X (vgl. Tab. IX p. 43)
Iridium

Fig. 14a.

ungefähr 20 Punkte berechnet. Jene geben ein Bild von dem Anteil, den die Oberflächenpartien der Kontakte, mit zunehmender Entfernung von der Achse, an der Stromleitung haben. Die folgende Tabelle 10 gibt die so gefundenen Werte

für C wieder. Die Rechnung wurde für Gold und Iridium bei je drei Kontaktabständen: $X_0 = 10$, 20 und 40 $\mu\mu$ durchgeführt. In der Tabelle finden sich außerdem noch die zur Berechnung von C aus der Gleichung (4) nötigen Werte von i/e (entnommen aus Fig. 10) für die drei betreffenden Abstände X_0.

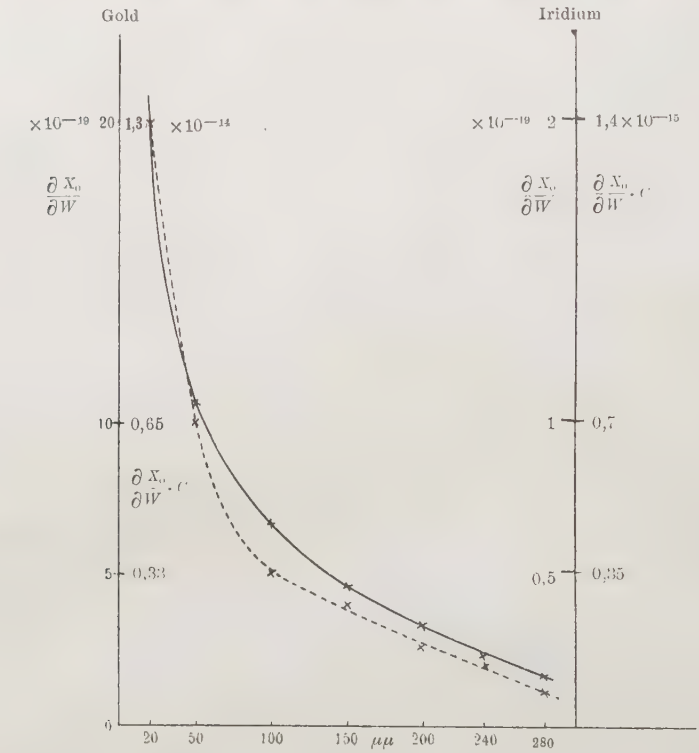


Abszisse: y in μ (Abst. von der Achse)
Ordinate: y/W_X (siehe Tab. IX p. 43)
Gold
Fig. 14 b.

Tabelle X.

	Iridium			Gold		
X_0	$\frac{i}{e}$	$\frac{y \cdot dy}{W_X}$	C	$\frac{i}{e}$	$\frac{y \cdot dy}{W_X}$	C
$\mu\mu$ 10	$9{,}77 \times 10^{-14}$	215 qcm	7246	$87{,}2 \times 10^{-14}$	217 qcm	6666,6
20	2,9	115,5	4098	31,0	134	3703,7
40	0,85	60,5	2232	8,5	80,6	1694,9
	1 qcm = 100×10^{-22} Fig. 14 a.			1 qcm = 1000×10^{-22} Fig. 14 b.		

Die Werte für C sind nun noch in die Gleichung $L = C \cdot l$ einzusetzen um das spezifische Leitvermögen zu erhalten. Zu diesem Zweck benötigen wir noch eine Kurve, welche dX_0/dW als Funktion von X_0 darstellt; diese ist für Gold und Iridium in Fig. 15 wiedergegeben. Es sind darin die Ordinatenwerte



Ordinate: $\frac{\partial X_0}{\partial W} \cdot C$ Abszisse: Abstände in $\mu\mu$.

——— = Gold $C = 6666$ - - - - - - - = Iridium $C = 7246$

Fig. 15.

noch mit dem gefundenen C zu multiplizieren um die spezifischen Leitfähigkeitswerte zu erhalten; diese neuen Werte stehen in Fig. 15 jeweils für das betreffende Metall rechts von der zugehörigen Ordinate. Das spezifische Leitvermögen ergibt sich also von der Größenordnung: 10^{-14}.

Wir haben als Grundlage für die ganze vorstehende

Betrachtung die Annahme gemacht, daß das spezifische Leitvermögen L nahe der Achse A proportional l sei. Diese Annahme wird um so zutreffender sein, je kleiner der Kontaktabstand ist. Hieraus kann weiter der Schluß gezogen werden, daß der größte für C erhaltene Wert der wahrscheinlichste sein wird, da ja die für verschiedene Kontaktabstände X_0 gefundenen Werte für C verschieden sind. Mit diesem wahrscheinlichsten Wert sind in Fig. 15 die Ordinatenwerte multipliziert (wie oben schon erwähnt). Wir erhalten so das Resultat, daß die gefundene „Konstante" C selbst wieder eine Funktion des Kontaktabstandes ist.

Die ganze vorliegende Betrachtung sollte zunächst nur dazu dienen, die Größenordnung des Leitvermögens und der zwischen den Kontakten übergehenden Strömen festzulegen. Die geplante Fortsetzung der Versuche soll zu weiteren Ergebnissen in theoretischer Hinsicht bezüglich der Elektronenatmosphären der Metalle führen.

In neuester Zeit ist eine amerikanische Arbeit erschienen[1]), die sich mit der Frage der Elektronenatmosphären der Metalle, jedoch auf ganz anderer, experimenteller Grundlage befaßt. Die Versuche haben dargetan — ebenfalls im Gegensatz zu den, von R. W. Wood beobachteten Erscheinungen (l. c.) —, daß bei einem Kontaktabstand von einer bis zwei Lichtwellenlängen „vollkommene Isolation herrsche". Dieses Ergebnis stimmt mit den von mir schon früher bei niederen Spannungen beobachteten Erscheinungen vollkommen überein.[2])

Ebenfalls im Einklang mit den vorliegenden Untersuchungen hinsichtlich der Abstände, in denen ein Leitungsvorgang beobachtet wurde, steht das von Debye theoretisch abgeleitete Ergebnis über die Höhe der Elektronenschicht über einer Metalloberfläche.[3]) Diese ist von der Größenordnung 10^{-4} cm (kein Potential angelegt), so daß die beobachteten Entladungserscheinungen, die ja in einem Abstand, kleiner als eine Lichtwellenlänge, beobachtet wurden, sich diesem Resultat gut anschließen.

1) F. C. Brown, The Physikal Review, Oktober 1913, p. 314.

2) F. Rother, Physikalische Zeitschrift 1911, p. 671; Ber. d. k. sächs. Ges. d. Wissensch. math. phys. Klasse vom 21. Juli 1913.

3) P. Debye, Ann. d. Physik, **33**, p. 441, 1910.

Zusammenfassung der Resultate.

1. Es wurde eine optische Anordnung beschrieben, die es ermöglicht, zwei Kontakte durch einen sehr kleinen, meßbaren Abstand zu trennen.

2. Es wurde gefunden, daß zwischen zwei, durch einen sehr kleinen Abstand (unter einer Lichtwellenlänge) getrennten Kontakten, schon bei geringer angelegter Spannung (bis zu etwa 1 Volt abwärts) ein Stromübergang stattfindet. Es gelang die übergehenden Ströme (Größenordnung: 10^{-14} Amp.) quantitativ zu messen.

3. Es wurde zur Messung dieser äußerst schwachen, durch sehr kleine Kontakttrennungsstrecken gehenden Ströme, zum ersten Male das Elektrometer benutzt. Bisher war dasselbe nur zur Bestimmung von Entladungspotentialen benutzt worden. (Siehe die eingangs zitierten Arbeiten.)

4. Im Zusammenhang mit dieser Meßmethode wurde ein Kugelkondensator angegeben, der leicht von überkriechenden Ladungen frei zu halten war.

5. Es wurde eine Poliermethode beschrieben, die sehr reine, optisch gute Metallflächen liefert; dieselben zeigten sich auch für die elektrischen Versuche als brauchbar.

6. Es wurde gezeigt, daß eine Methode, die für Entladungsversuche über sehr kleine Kontakttrennungsstrecken, Linsen mit sehr großem Krümmungsradius und kathodischem Metallspiegel als Kontakte benutzt, auf unüberwindliche, experimentelle Schwierigkeiten führt.

7. Es wurde festgestellt, daß unter sonst gleichen Bedingungen, die, bei sehr kleinen Kontaktabständen übergehenden Ströme, für zwei verschiedene Metalle verschieden waren; dabei zeigte dasjenige Metall mit der größeren metallischen Leitfähigkeit auch im vorliegenden Falle einen größeren Effekt. Dieser stand jedoch für die beiden untersuchten Metalle (Gold und Iridium) nicht im gleichen Verhältnis, wie die metallischen Leitfähigkeiten, sondern erwies sich als etwa drei mal so groß.

8. Aus dieser Verschiedenheit der Erscheinung für verschiedene Metalle wurde hauptsächlich der Schluß gezogen,

daß die beobachtete Stromleitung über die kleinen Kontakttrennungsstrecken durch Metallelektronen betätigt würde. Die Erscheinung war in Luft von Atmosphärendruck und in einem Vakuum von etwa 0,5 mm nicht meßbar verschieden.

9. Ein Versuch, die Leitfähigkeitskonstante der Elektronenatmosphären und damit das scheinbare spezifische Leitvermögen der Atmosphären (im reziproken Ohm) zu bestimmen, zeigte, daß diese „Konstante" wieder eine Funktion des Kontaktabstandes ist. Das scheinbare spezifische Leitvermögen ergab sich für Gold von der Größenordnung 10^{-14}, für Iridium von 10^{-15} (in reziproken Ohm).

10. Es besteht die Möglichkeit, daß das bei den Erscheinungen beobachtete „Ohmsche Gesetz" in größeren Kontaktabständen nicht mehr gilt. Eine Andeutung dafür geht aus den Stromwerten (in Tab. IV–VI auf p. 36) insofern hervor, als für geringe Spannungen bei größeren Abständen kein Stromübergang mehr eintritt. Es wäre verfrüht, hierüber jetzt schon etwas aussagen zu wollen; eine Aufklärung auch in dieser Hinsicht wird hoffentlich die Fortsetzung der Versuche bringen.

Lebenslauf.

Ich, Franz Rother, ev.-lutherischer Konfession, bin geboren am 15. Mai 1887 zu Nürnberg. Nachdem ich dort im Jahre 1905 das Realgymnasium absolviert hatte, besuchte ich die Universitäten: Leipzig, Grenoble, Kiel, Leipzig um Physik, Chemie und Astronomie zu studieren. Im Jahre 1910 machte ich das chemische Verbandsexamen im Laboratorium für angewandte Chemie zu Leipzig. Seit 1. Oktober 1911 bin ich Assistent am Physikalischen Institut der Universität Leipzig.